



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

UNIVERZÁLNÍ ÚSTŮVÉ ZAŘÍZENÍ NA ÚTOČNOU PUŠKU

UNIVERSAL MUZZLE DEVICE FOR AN ASSAULT RIFLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Rušar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Vtípil, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Filip Rušar**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Vtípil, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Univerzální úst'ové zařízení na útočnou pušku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úst'ová zařízení palných zbraní vytváří při výstřelu korekční síly, které eliminují nežádoucí vliv působících sil od výstřelu jako je zdvih nebo zpětný ráz, nebo se snaží minimalizovat optické či hlukové projevy výstřelu. Současná úst'ová zařízení jsou nejčastěji jednoduchá jednoúčelová zařízení, která kompenzují konkrétní nežádoucí jev. Využití nekonvenčních tvarových prvků a možností aditivních technologií může zlepšit některé klíčové parametry nebo kombinovat funkce různých typů úst'ových zařízení do jednoho produktu.

Typ práce: vývojová – konstrukční
Projekt: Vývojová zakázka (HS)

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je navrhnout univerzální ústřové zařízení na útočnou pušku s těmito parametry: tlumení plamene, minimalizace zpětného rázu, minimalizace hluku, výroba aditivní technologií selective laser melting.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analyzovat účinnost a tvar různých typů ústřových zařízení,
- navrhnout několik variant ústřového zařízení,
- výpočtově ověřit funkčnost navržených variant,
- realizovat funkční vzorek vybrané varianty ústřového zařízení.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

PLÍHAL, B. Přechodová balistika hlavních zbraní. Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2007. ISBN 9788072312429.

HUDSON, M., C. LUCHINI, K. CLUTTER, a W. SHYY. The Evaluation of Computational Fluid Dynamics Methods for Design of Muzzle Blast Suppressors for Firearms, Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2001, 26: 201–208. doi:10.1002/1521-4087(200110)26:4<201::AI-PREP201>3.0.CO;2-7

REHMAN, H., S. H. HWANG, B. FAJAR, H. CHUNG a H. JEONG. Analysis and attenuation of impulsive sound pressure in large caliber weapon during muzzle blast. Journal of Mechanical Science and Technology [online]. 2011, 25(10), 2601-2606 [cit. 2016-04-28]. DOI: 10.1007/s12206-011-07-1-2. ISSN 1738494x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12206-011-0731-2>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem univerzálního úst'ového zařízení pro útočnou pušku. Zařízení je navrženo pro výrobu aditivní technologií Selective Laser Melting. hlavní význam spočívá v eliminaci nežádoucích jevů při výstřelu.

Práce zkoumá možnosti využití porézních struktur pro tento typ zařízení. Je sledován vliv jednotlivých typů porézních struktur na proudění plynů. Samotné univerzální úst'ové zařízení je optimalizováno pomocí CFD analýz. Zařízení bylo vyrobeno pomocí technologie SLM a experimentálně ověřeno. Zkoumán byl jeho vliv na zpětný ráz, zdvih zbraně, hluk a schopnost eliminovat plamen.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, Selective Laser Metling, SLM, úst'ová brzda, úst'ové zařízení

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of a universal muzzle device for the assault rifle. The device is designed to produce Selective Laser Melting. The main objective is the elimination negative effects of gunshot.

The paper explores possibilities of using porous structures for this type of equipment. The influence of individual types of porous structures on the flow of gases is monitored. The universal muzzle device itself is optimized using CFD analyzes. The device was made using SLM technology and experimentally verified. His impact on the impact, gun lift, noise and flame elimination was investigated.

KEY WORDS

3D print, Selective Laser Melting, SLM, muzzle brake, muzzle device

BILBIOGRAFICKÁ CITACE

RUŠAR, F. *Univerzální ústové zařízení na útočnou pušku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 110 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Vtípil, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci *Univerzální ústřední zařízení* jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Jaroslava Vtípila, Ph.D. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 19. května 2017

.....
Bc. Filip Rušar

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu práce Ing. Jaroslavu Vtípilovi, Ph.D. a doc. Ing. Danielu Koutnému. Ph.D. za poskytnuté rady a připomínky při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Jakubu Kubrickému za spolupráci a přínosné rady.

OBSAH

1 ÚVOD	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	14
2.1 Selective Laser Melting	14
2.2 Úst'ové zařízení.....	15
2.2.1 Tlumení hluku	15
2.2.2 Tlumení plamene	16
2.2.3 Tlumení zpětného rázu a kompenzace zdvihu.....	19
2.3 Přechodová balistika.....	19
2.3.1 Jevy před ústím hlavně při výstřelu	20
2.3.2 Analýza jevů po opuštění hlavně střelou	20
2.3.3 Měření v přechodové balistice.....	21
2.4 CFD analýzy výstřelu	22
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	24
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ.....	25
4.1 Navrhnuté varianty	25
4.1.1 Varianta Vortex	25
4.1.2 Varianta Birdcage	26
4.1.3 Varianta spirálová.....	27
4.1.4 Varianta akumulární.....	27
4.1.5 Varianta se strukturou.....	28
4.1.6 Varianta dvoukomorová	29
4.2 Využitelné struktury	30
4.2.1 Prutové struktury	30
4.2.2 Struktury definované matematickými funkcemi	32
4.3 Zhodnocení koncepcí.....	34
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	35
5.1 Vnitřní balistika	35
5.1.1 Vstupní parametry	35
5.1.2 Výsledky vnitřní balistiky	36
5.2 Generování struktur	38
5.2.1 Generování prutových struktur.....	38
5.2.2 Generování struktur definovaných matematickými funkcemi	38
5.2.3 Gradientní změny parametrů struktur.....	41
5.3 CFD analýzy vzorků struktur	44
5.3.1 Vzorek	44
5.3.2 Nastavení sítě.....	45
5.3.3 Nastavení programu ANSYS Fluent	46
5.3.4 Výsledky CFD analýz vzorků.....	49
5.4 Optimalizace parametrů struktury	53
5.4.1 Optimalizované parametry	53
5.4.2 Nastavení programu ANSYS Fluent	54
5.4.3 Výsledky optimalizace parametrů	54
5.5 CFD analýzy samotných zařízení.....	56
5.5.1 Nastavení CFD analýzy	56
5.5.2 Analýza vlivu střely	59

5.5.2 Analýza konstrukčních variant	60
5.5.3 Ověření funkce vortexu	62
5.5.4 Výpočet zatížení zařízení	62
5.6 Pevnostní výpočet zařízení	63
5.6.1 Pevnostní výpočet struktury	63
5.6.2 Pevnostní výpočet dvoukomorové varianty	65
5.7 Výsledná konstrukce	67
5.7.1 Celkové rozměry	68
5.7.2 Struktura	68
5.7.3 Vortex	69
5.8. Tisk zařízení	70
5.8.1 Parametry tisku	70
5.8.2 Postprocessing	70
5.9 Testování zařízení	71
5.9.1 Testování funkčnosti	72
5.9.2 Výskyt plamene	72
5.9.3 Měření zpětného rázu a kompenzace zdvihu	74
5.9.4 Měření hluku	77
6 DISKUZE	80
7 ZÁVĚR	82
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	83
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	85
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	86
11 SEZNAM TABULEK	89
12 SEZNAM PŘÍLOH	90
PŘÍLOHA 1 – GRAFY VNITŘNÍ BALISTIKY	93
PŘÍLOHA 2 – VÝSLEDKY CFD ANALÝZ	97
PŘÍLOHA 3 – VYHODNOCENÍ VÝSKYTU PLAMENE	108
PŘÍLOHA 4 – GRAFY MĚŘENÍ HLUKU	110

1 ÚVOD

1

Diplomová práce se zabývá návrhem univerzálního úst'ového zařízení na útočnou pušku. Útočná puška je dlouhá samočinná zbraň na puškové náboje používaná především v armádě, jelikož je práce vypracována ve spolupráci s firmou Česká zbrojovka Uherský Brod, jedná se konkrétně o zbraň CZ Bren 2 v ráži 7,62x39 mm.

Univerzální úst'ové zařízení se nachází na konci hlavně a jeho hlavní význam spočívá v tlumení zpětného rázu, redukci plamene, kompenzace zdvihu a snížení hluku při výstřelu. Je důležité pro optimalizaci chování zbraně při výstřelu.

Tato diplomová práce se zaměřuje zejména na možnosti využití technologie Selective Laser Melting při výrobě těchto součástí.

Cílem práce je konstrukční návrh univerzálního úst'ového zařízení s ohledem na tuto technologii výroby.

Cílem práce není optimalizace procesních parametrů pro výrobu technologií Selective Laser Melting, tato problematika je souběžně řešena v diplomové práci Bc. Jakuba Kubrického.

Aktuálně se úst'ová zařízení vyrábějí konvenčními technologiemi, které omezují jejich tvarové možnosti, při využití technologie 3D tisku se tvarové možnosti značně rozšiřují a nabízí tak více možností při jejich konstrukci. Například je možné využití porézních struktur, které dokážou uvést vytékající plyny do silného turbulentního proudění, přičemž ztrácí energii.



Obr. 1-1 Současné univerzální úst'ové zařízení CZUB

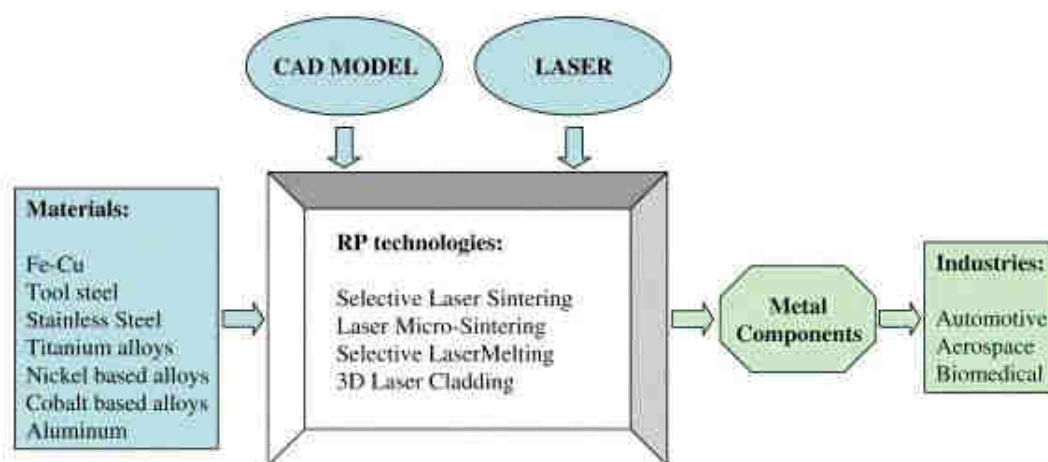
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Selective Laser Melting

Technologie nazývaná Selective Laser Melting (SLM) je druh aditivní technologie, kterou lze vytvářet složité trojrozměrné kovové díly. Technologie je velmi podobná technologii 3D tisku Selective Laser Sintering (SLS), s tím rozdílem, že energie je více soustředěna, což umožňuje plné roztavení prášku během procesu. Díky tomu je konečná hustota materiálu velmi blízko teoretické hodnotě [1].

Technologie je založena na principu nanášení velmi tenkých vrstev kovového prášku ($20 \div 100 \mu\text{m}$), který je následně spékán výkonným vláknovým laserem. Nejčastějšími typy laserů bývají CO_2 nebo Nd:YAG lasery s nepřetržitým chodem. Výkon laserů se pohybuje od 50 do 500 W, výjimečně jsou použity i výkonnější lasery [1].

VUT Brno vlastní 3D tiskárnu využívající technologii SLM od firmy SLM Solutions [2]. Tiskárna je vybavena laserem typu YLR-Faser-Laser o výkonu 400 W. Tloušťka vrstvy kovového prášku je v rozmezí $20 \div 50 \mu\text{m}$. Mezi materiály se známými procesními parametry patří hliníková slitina AlSi10Mg, AlSi12, nerezová ocel 316L (1.4404) a titanová slitina TiAl6V4. Maximální velikost dílů je 280 x 280 x 350 mm.



Obr. 2-1 Schéma výroby kovových dílů pomocí aditivních technologií [1]

2.2 Úst'ové zařízení

Úst'ové zařízení je součást, která se nachází na konci hlavně u palných zbraní.

Zařízení má 4 základní funkce:

- Tlumení plamene
- Redukce zpětného rázu
- Kompenzace zdvihu zbraně
- Tlumení hluku

Univerzální úst'ové zařízení tyto funkce kombinuje. Při použití zařízení na útočné pušce je nejdůležitější tlumení plamene, následuje tlumení zpětného rázu a nejméně důležité je tlumení hluku. U odstřelovačích pušek je nejdůležitější tlumení hluku a zpětného rázu [3].

2.2.1 Tlumení hluku

Existuje několik základních principů tlumení hluku při výstřelu [3]:

- Expanzní princip
- Absorpční princip
- Vířivý princip
- Akumulační princip
- Princip změny frekvence zvuku



Obr. 2-1 Úst'ové brzdy [4,5]

Expanzní princip

Spočívá ve zpomalení rozpínání hnacích plynů, které vycházejí z hlavně. Nejčastěji se jedná o komorové tlumiče. Při využití více komor se dosáhne lepšího tlumícího účinku [3].

Absorpční princip

U tohoto principu tlumení dochází k ochlazení výtokových plynů, díky tomu dojde ke snížení tlaku těchto plynů. Plyny proudí kolem přepážek, či struktur z dobře

vodivých materiálů, které dobře odvádí teplo. Tento princip samostatně není příliš účinný, proto je nutné jej kombinovat s ostatními principy [3].

Vířivý princip

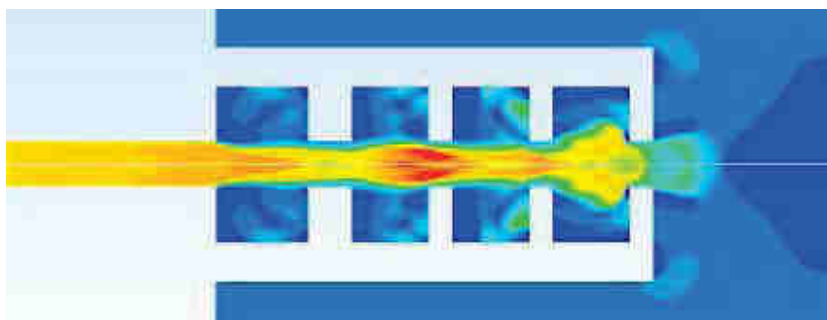
Jedná se o jeden z nejstarších principů. Plyny v úst'ovém přechází v silně turbulentní proudění. Dochází ke snížení rychlosti plynů a tím i ke snížení tlaku [3].

Akumulační princip

U akumulčního principu je energie plynu předávána nějaké části úst'ového zařízení, touto částí může být například píst na pružině. Plyn tak koná práci, snižuje se jeho energie a tím i rychlost a tlak [3].

Princip změny frekvence zvuku

Nedochází přímo k tlumení hluku, pouze ke změně jeho frekvence. Důsledkem je, že výstřel je těžší identifikovat. Obecně není tento princip příliš účinný, je vhodné ho spíše kombinovat s ostatními principy [3].



Obr. 2-2 Vícekomorový expanzní tlumič hluku [6]

2.2.2 Tlumení plamene

Základní fyzikální principy, které se využívají pro tlumení plamene, jsou totožné jako u tlumení hluku. Liší se jejich využívání. Výskyt plamene je určen zejména teplotou plynů vytékajících z hlavně a jejich chemickým složením [7].

Pro tlumení plamene je možné také využít principu rozptýlení plynů dříve, než se smísí s okolním vzduchem do ideálního poměru pro hoření [17].

Tlumiče plamene používané v dnešní době mohou mít několik typů konstrukcí:

- Cone
- Duckbill
- Birdcage
- Vortex
- Noveske

Cone

Jde o nejstarší typ tlumiče plamene, jedná se o kužel umístěný na konci hlavně. Používal se zejména na konci Druhé světové války u pušek Lee-Enfield. K ovlivnění výtokových plynů je využíván expanzní princip [12].



Obr. 2-3 Tlumič plamene typu Cone [13]

Duckbill

Tlumič plamene typu Duckbill je charakteristický tím, že má několik „hrotů“ směřujících dopředu, ty mají usměrňovat plyny do stran a uvádět je do silného turbulentního proudění. Využíván je vířivý princip kombinovaný s expanzním principem. Nevýhoda této konstrukce byla objevena až na bojišti, kde docházelo k zachytávání vegetace do tlumiče [14].



Obr. 2-4 Tlumič plamene typu Duckbill [15]

Birdcage

Konstrukce typu Birdcage vychází z konstrukce Duckbill. Je však opatřena zpeňujícím kruhem na konci tlumiče, který brání zachytávání vegetace. Také využívá vířivý princip v kombinaci s expanzním [14].



Obr. 2-5 Tlumič plamene typu Birdcage [16]

Vortex

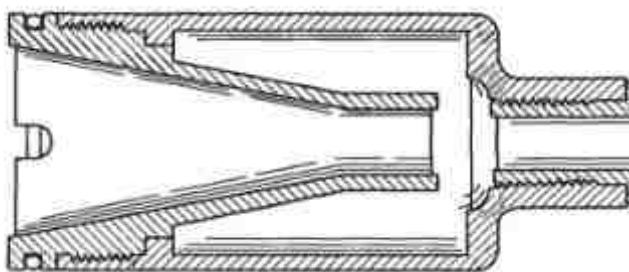
Tlumič plamene typu Vortex se vyznačuje až 99% redukcí viditelného plamene. Jeho konstrukce využívá převážně vířivého principu v kombinaci s expanzním. Vychází z tlumiče typu Duckbill, jeho boční křivka má však tvar šroubovice s úhlem $5 - 15^\circ$. [17]



Obr. 2-6 Tlumič plamene typu Vortex [16]

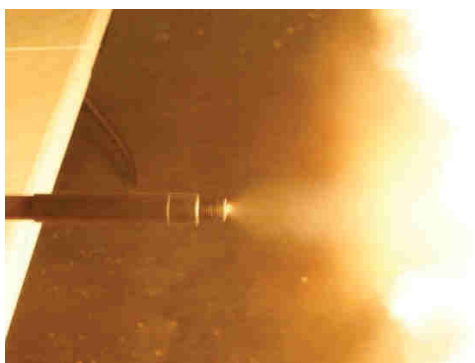
Noveske

K nejmodernějším tlumičům plamene patří konstrukce Noveske. Využívá expanzního principu, kde plyny expandují do uzavřeného prostoru. Tyto plyny se pak částečně vrací do hlavně, což napomáhá přebíjení některých zbraní po výstřelu. Tlumení plamene je vysoce účinné, jsou však zvýšeny nároky na pevnost tlumiče [18].



Obr. 2-7 Tlumič plamene typu Noveske [18]

Porovnání některých tlumičů plamene lze vidět na obr. 2-9 až 2-11. Na obr. 2-8 je zobrazen výstřel bez použití tlumiče plamene.



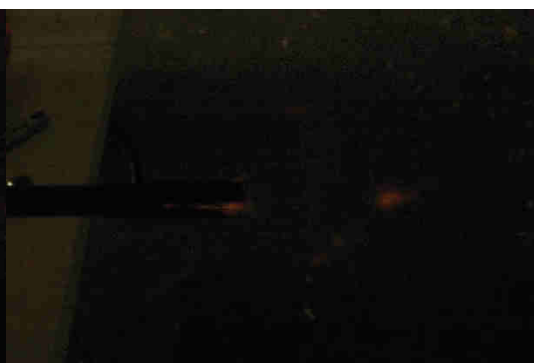
Obr. 2-8 Žádný tlumič plamene [19]



Obr. 2-9 Tlumič plamene typu Duckbill [19]



Obr. 2-10 Tlumič plamene typu Duckbill [19]



Obr. 2-11 Tlumič plamene typu Vortex [19]

2.2.3 Tlumení zpětného rázu a kompenzace zdvihu

Při tlumení zpětného rázu je proud vytékajících plynů usměrněn úst'ovým zařízením směrem dozadu. Dochází tak k menšímu pohybu zbraně při výstřelu. Usměrnění plynů se realizuje pomocí otvorů v úst'ovém zařízení. Druhou možností je lineární redukce zpětného rázu, kdy jsou plyny zadrženy rovnou plochou v zařízení.

Pro kompenzaci zdvihu je nutné vytékající plyny usměrnit směrem nahoru. Ke zdvihu dochází, pokud je osa hlavně nad osou pažby. Při výstřelu tedy vzniká moment, který při výstřelu zbraň zvedá. Kompenzace je řešena speciálními otvory, nebo nesymetričností konstrukce [20].

2.3 Přechodová balistika

Přechodová balistika (někdy také nazývána perioda dodatečného účinku prachových plynů) se zabývá studiem jevů, které nastávají bezprostředně po opuštění hlavně střelou. Na střelu stále působí vytékající plyny, které střelu dále urychlují. Ke zrychlování střely dochází ještě ve vzdálenosti desetinásobku až třicetinásobku ráže hlavně od ústí hlavně [7].

2.3.1 Jevy před ústím hlavně při výstřelu

Při výstřelu dochází k několika různým jevům, které mají vliv na střelu, okolí, zbraň i obsluhu. Mezi tyto jevy patří [7] :

- Tlakové pole utvářející se před střelou
- Silné tlakové pole opouštějící hlavěň za střelou
- Záblesk
- Zákluz hlavně

Jevy se dají také charakterizovat pomocí rozdělení energie uvolněné hořením směsi [7]:

- Cca 30% je kinetická energie střely
- Cca 60% je energie vytékajících plynů (z toho cca 45% energie reprezentuje pohyb těchto plynů, zbylá energie reprezentuje tlak a teplotu)
- Cca 10 % jsou ztráty třením, zákluzem, atd.

2.3.2 Analýza jevů po opuštění hlavně střelou

Pohyb plynů

Pohyb plynů při výstřelu lze rozdělit na dvě úlohy [7]:

- a) Střela pohybující se v hlavni

Lze ji poměrně jednoduše popsat pomocí systému rovnic v Eulerových souřadnicích:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0 \quad (1-3)$$

Kde: u – rychlost vytékajících plynů

ρ – hustota plynů

φ – entropie

x – poloha střely v hlavni

t – čas

- b) Pohyb plynů vně hlavně – tato úloha je podstatně složitější a řeší se nejčastěji pomocí exponentů získaných z experimentů

Předpovídání úst'ového plamene

Výskyt úst'ového plamene se dá předvídat pomocí metodiky Carfanga. Při prognóze plamene je třeba rozlišit typy záblesků [7]:

- Primární záblesk
- Přechodový záblesk
- Sekundární záblesk

Dále je nutné znát následující charakteristiky [7]:

- Teplotu plamene výmetné náplně
- Termodynamickou účinnost
- Koncentrace spalných látek v úst'ových plynech
- Typ chemického tlumiče plamene

Výsledkem metodiky Carfanga je parametr teploty plynů. S jeho pomocí lze určit zda-li se úst'ový plamen vyskytne či nikoliv [7].

2.3.3 Měření v přechodové balistice

Měření rychlosti plynů

Protože prachové plyny obsahují značné množství pevných částic, není vhodné použít jakoukoliv metodu, která obsahuje mechanické měřicí sondy. Dochází totiž k dalšímu víření plynů, což vyvolává nepřesnosti [7].

Vhodné metody pro měření rychlosti plynů jsou například [7]:

- Metoda zářících indikátorů
- Laserové dopplerovské měření
- Fotografické měření

Měření tlaku plynů

Při výstřelu vzniká několik různých tlakových vln. Druhy měření tlaku mohou tedy být [7]:

- Měření statického tlaku
- Měření tlaku po odrazu tlakové vlny
- Měření tlaku zbrzdění
- Měření dynamického tlaku

Pro měření jednotlivých tlaků lze použít například všesměrový piezoelektrický tlakoměrný snímač, případně válcový (tužkový) snímač tlaku [7].

2.4 CFD analýzy výstřelu

Porovnáváním CFD (Computational Fluid Dynamics) analýzy a experimentu se věnovali Hudson a kolektiv [9]. Zaměřili se zejména na porovnání hodnot bez úst'ového zařízení a s úst'ovým zařízením. V experimentální části vyhodnocují tlakové špičky u ručních palných zbraní ráže 0,22' a 0,38'. Měření probíhalo na otevřené střelnici, aby odražené zvuky neovlivnily měření. Akustická data byla měřena kondenzátorovým mikrofonom typ Bruel and Kjaer 4135. Tento snímač má snímací frekvenci 100 kHz, a poskytuje výstup 3,39 mV/Pa. Umístění snímače se v průběhu měření měnilo, natočení bylo paralelní k ose hlavně.

V současné době se pro CFD analýzy výstřelu využívají Navier-Stokesovy rovnice pro proudění při chemických reakcích. Hudson a kolektiv [9] však využívají upravené Eulerovy rovnice proudění s proměnnými ohřevy.

Po diskretizaci, nabývají rovnice tvaru:

$$\frac{\partial JQ}{\partial t} + \frac{\partial JF}{\partial \xi} + \frac{\partial JG}{\partial \eta} + JH = 0 \quad (2-1)$$

Kde:

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho \alpha_1 \\ \vdots \\ \rho \alpha_{NS-1} \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho uU + \xi_x P \\ \rho vU + \xi_y P \\ U(\rho E + P) \\ \rho \alpha_1 U \\ \vdots \\ \rho \alpha_{NS-1} U \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uV + \eta_x P \\ \rho vV + \eta_y P \\ V(\rho E + P) \\ \rho \alpha_1 V \\ \vdots \\ \rho \alpha_{NS-1} V \end{bmatrix}, H = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ v(\rho E + P) \\ \rho \alpha_1 v \\ \vdots \\ \rho \alpha_{NS-1} v \end{bmatrix}$$

Jakobián je definován jako:

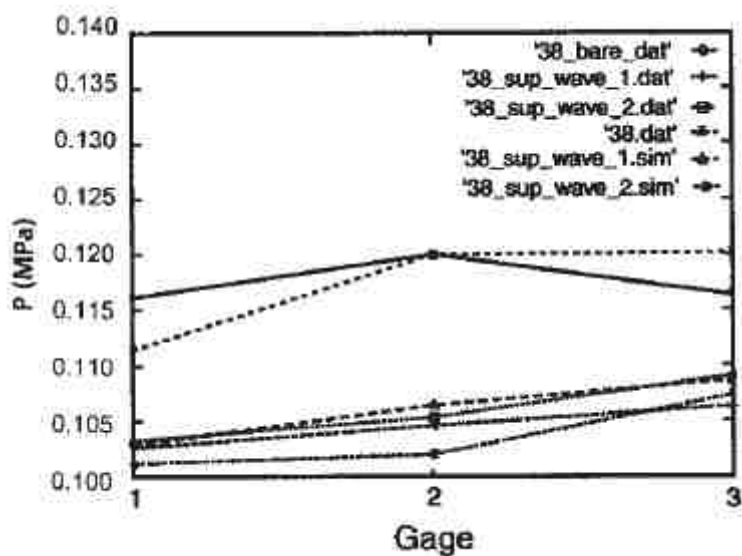
$$\begin{aligned} J &= x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi \\ U &= \xi_x u + \xi_y v \\ V &= \eta_x u + \eta_y v \end{aligned}$$

Dále je nutné znát také vlastnosti plynu, tyto vlastnosti je možné popsat rovnicí ideálního plynu, pokud jsou do ni zahrnuty všechny složky plynu [9].

Pro správné zvolení okrajových podmínek je třeba provést také analýzu vnitřní balistiky. Hodnoty z vnitřní balistiky pak slouží jako vstupní hodnoty CFD analýzy výtoku plynů. Hlavními okrajovými podmínkami jsou teplota, tlak, historie rychlosti poblíž konce hlavně a složení plynu.

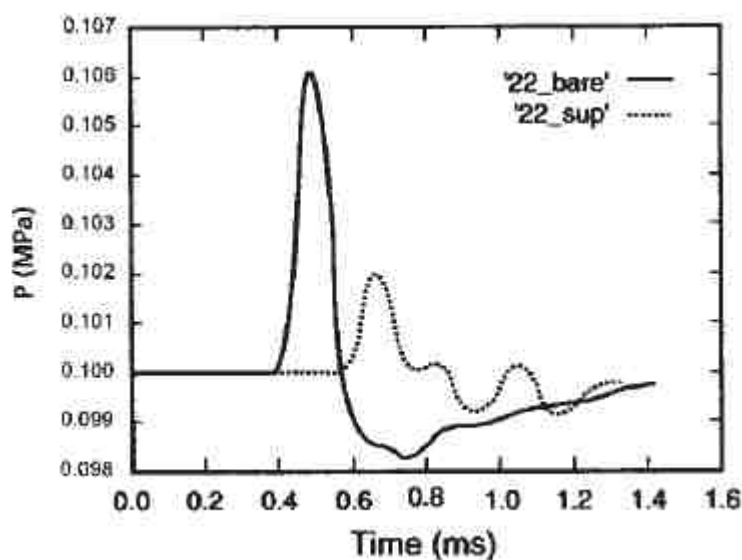
Hudson [9] uvažoval při analýze 3 druhy plynů, a to: O₂, N₂ ve vzduchu a hnací plyn.

Na obr. 2-12 jsou zobrazena data z experimentu a také data simulovaná při použití ráže 0,38'. Bod 1 se nachází nejbližší hlavně (ve stejné vzdálenosti při experimentu i simulaci), je tedy poznat že zvolené okrajové podmínky nebyly úplně v pořádku. Aby se dosáhlo lepších výsledků, bylo by nutné navýšit při simulaci tlak v hlavni.



Obr. 2-12 Porovnání tlakové špičky experimentu a simulace u zbraně ráže 0,38' [9]

Účinnost úst'ového zařízení lze dobře vidět na obr. 2-13, kde jde vidět tlaková špička. Z obrázku je patrné, že úst'ové zařízení značně snížilo tlak, a tím také hluk vydávaný zbraní při výstřelu. Plná čára značí tlak bez použití úst'ového zařízení, přerušovaná s úst'ovým zařízením.



Obr. 2-13 Simulovaný tlak od zbraně ráže 0,22' [9]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Z rešerše vyplynulo, že technologie SLM je vhodná pro prototypovou výrobu univerzálního úst'ového zařízení, má však jistá omezení se kterými je nutné při návrhu konstrukce počítat.

Konstrukce by měla co nejlépe kombinovat všechny 4 základní funkce úst'ového zařízení a pomocí analýz najít optimální řešení. Při tvorbě konstrukce je také nutné vzít v úvahu výše uvedené konstrukční principy tlumení hluku. Jako nejvhodnější se jeví využití struktur k víření vytékajících plynů.

Simulaci pohybu plynů je třeba rozdělit na dvě samostatné úlohy, a to: vnitřní balistiku a přechodovou balistiku. Aby bylo možné úspěšně simulovat přechodovou balistiku, je nutné jako okrajové podmínky zadat veličiny získané simulací vnitřní balistiky. Vzhledem k tomu, že při výstřelu dochází k silnému turbulentnímu proudění, ideální by bylo využít pokročilý turbulentní model jako např. model AUSMPW+, program ANSYS Fluent však takovéto řešení nenabízí a jeho implementace by byla příliš náročná, proto je v práci turbulentní model založený na Navier-Stokesových rovnicích.

Cílem práce je konstrukční návrh univerzálního úst'ového zařízení. V práci by mělo být využito možností aditivních technologií pro inovativního řešení. Součástí práce bude také CFD analýza proudění plynů v okolí úst'ového zařízení. Konstrukce bude také podrobena strukturální analýze.

Ověření konstrukce bude provedeno několika zkouškami:

- Testování funkčnosti
- Ověření výskytu plamene
- Měření hluku
- Měření kompenzace zdvihu
- Měření zpětného rázu

Doplňkovou zkouškou může být zkouška trvanlivosti.

Hlavním cílem je vyrobit funkční vzorek univerzálního úst'ového zařízení na útočnou pušku. Dále tento vzorek otestovat a porovnat se stávajícím úst'ovým zařízením.

Práce je vypracovávána souběžně s diplomovou prací Bc. Jakuba Kubrického, průběžné výsledky obou prací jsou sdíleny.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Na základě odborné rešerše a analýzy existujících zařízení na trhu bylo navrženo několik konceptů řešení. Priority jednotlivých funkcí zařízení byly CZUB definovány takto (seřazeno sestupně dle důležitosti):

- Tlumení plamene
- Kompenzace zdvihu
- Redukce zpětného rázu
- Tlumení hluku

Základem jednotlivých návrhů jsou principy uvedené v rešeršní části.

4.1 Navrhnuté varianty

4.1.1 Varianta Vortex

Principem této varianty je zabránění plynům ve vytvoření ideálního poměru směsi s okolním kyslíkem pro hoření, díky tomu nedojde k druhotnému zapálení plynů, který způsobuje nejvýraznější zášlehy při střelbě.

Tlumení zpětného rázu je částečně realizováno bržděním plynů v koncové části zařízení pomocí struktur (obr. 4-2).

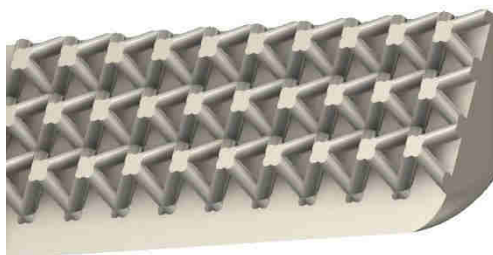
Tato varianta umožňuje také kompenzaci zdvihu zbraně při použití nesymetrických drážek.



Obr. 4-1 Konceptní varianta Vortex

Tab. 4-1 Souhrn varianty Vortex

Varianta Vortex	
Tlumení plamene	Redukce kyslíku
Redukce zpětného rázu	Zadržení části plynů strukturou
Kompenzace zdvihu	Nesymetrickost drážek
Tlumení hluku	Žádné
Výhody	Osvědčená konstrukce Jednoduchost
Nevýhody	Netlumí hluk Nutno optimalizovat také rezonanční frekvence



Obr. 4-2 Struktura v koncové části zařízení

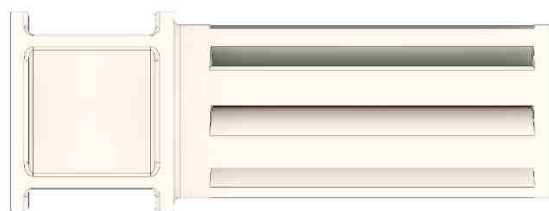
4.1.2 Varianta Birdcage

Tato varianta vychází z konstrukce typu Birdcage, speciálním konstrukčním prvkem je tvar drážek, které jsou navrženy tak, aby plamen vyskytující se uvnitř zařízení nebyl pro vnějšího pozorovatele viditelný. Využito je expanzního principu v kombinaci s vířivým.

Kompenzace zdvihu je řešena nesymetrickými drážkami v zařízení. Drážky ve vrchní části zařízení jsou větší, díky tomu jimi proudí více plynů, což vytváří reakční sílu směřující k zemi.



Obr. 4-3 Koncepční varianta Birdcage



Obr. 4-4 Pohled ze strany



Obr. 4-5 Řez zařízením

Tab. 4-2 Souhrn varianty Birdcage

Varianta Birdcage	
Tlumení plamene	Expanzní, vířivé
Redukce zpětného rázu	Lineární
Kompenzace zdvihu	Nesymetrickost drážek
Tlumení hluku	Expanzní
Výhody	Osvědčená konstrukce
Nevýhody	Náročná demontáž zařízení (funkcí se utahuje)

4.1.3 Varianta spirálová

Principem tlumení plamene je stejný jako u varianty Vortex. Návrh však uvažuje více drážek, přičemž některé z nich jsou uzavřené. Tato varianta slouží výhradně jako tlumič plamene, tlumení zpětného rázu a hluku je velmi slabé.



Obr. 4-6 Spirálová varianta s více drážkami



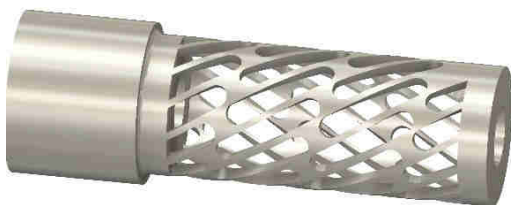
Obr. 4-7 Spirálová varianta s méně drážkami

Tab. 4-3 Souhrn spirálové varianty

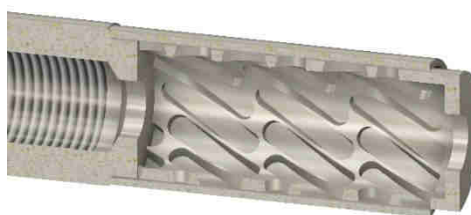
Varianta spirálová	
Tlumení plamene	Redukce kyslíku
Redukce zpětného rázu	Žádné
Kompenzace zdvihu	Nesymetričnost drážek
Tlumení hluku	Žádné
Výhody	Dobré tlumení plamene
Nevýhody	Netlumí hluk a zpětný ráz

4.1.4 Varianta akumulční

U této koncepční varianty je využíván akumulční princip, kde dochází k elastické deformaci vnitřní části zařízení. Plyny tím konají práci a snižuje se jejich celková energie. Funkcí vnějšího pláště je skrytí plamene vyskytujícího se uvnitř zařízení. Vnější a vnitřní plášť jsou odděleny.



Obr. 4-8 Akumulační varianta bez pláště



Obr. 4-9 Akumulační varianta s pláštěm

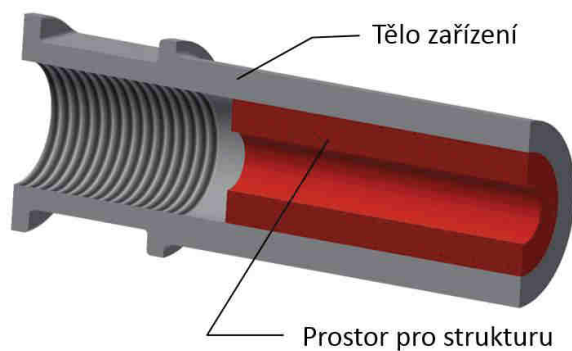
Tab. 4-4 Souhrn akumulací varianty

Varianta akumulací	
Tlumení plamene	Akumulací
Redukce zpětného rázu	Lineární
Kompensace zdvihu	Žádná
Tlumení hluku	Akumulací
Výhody	Účinnější tlumení hluku
Nevýhody	Složitost konstrukce Náročnost výpočtu Nekompenzuje zdvih

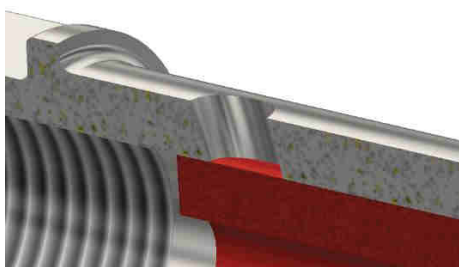
4.1.5 Varianta se strukturou

Technologie SLM nabízí značné tvarové možnosti zejména v oblasti struktur a strukturovaných dílů, čehož využívá tato koncepční varianta. Využit je zde vířivý princip, plyny jsou tedy uvedeny do silného turbulentního proudění.

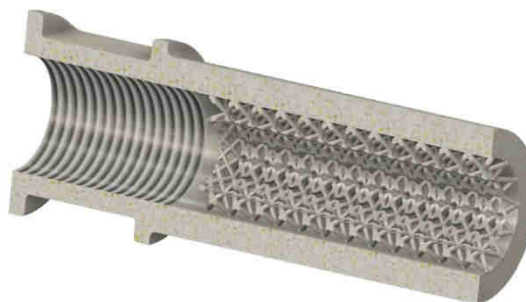
Kompensace zdvihu je řešena otvorem ve vrchní části zařízení, redukce zpětného rázu je lineární. Nevýhodou této koncepce jsou zvýšené nároky na pevnost struktury.



Obr. 4-10 Varianta se strukturou



Obr. 4-11 Kompensace zdvihu



Obr. 4-12 Varianta s lattice structure

Tab. 4-5 Souhrn varianty se strukturou

Varianta se strukturou	
Tlumení plamene	Vířivé
Redukce zpětného rázu	Zadržení části plynů strukturou
Kompenzace zdvihu	Otvory
Tlumení hluku	Expanzní
Výhody	Jednoduchost Možnost využití velkého množství druhů struktur
Nevýhody	Nároky na pevnost struktury

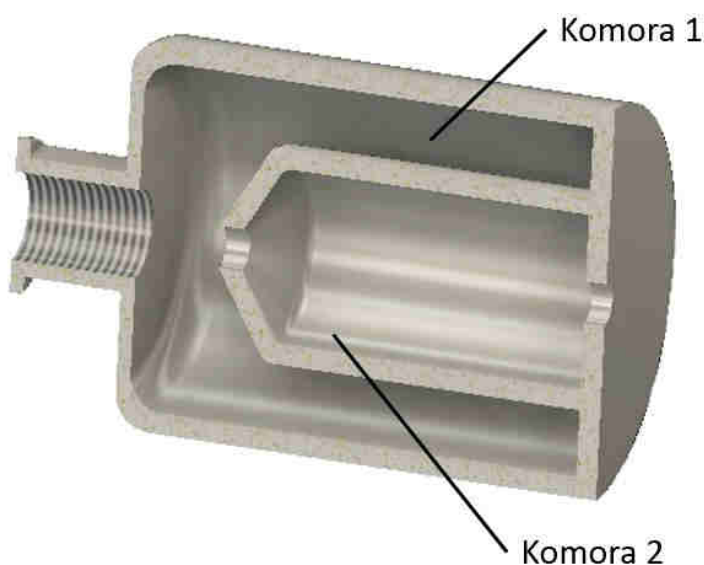
4.1.6 Varianta dvoukomorová

Poslední navrhnutou koncepční variantou je dvoukomorová. Tato varianta nejlépe kombinuje všechny funkce, které může ústové zařízení plnit. Nabízí také značné množství modifikací, které umožňují nakombinovat jednotlivé funkce dle potřeby.

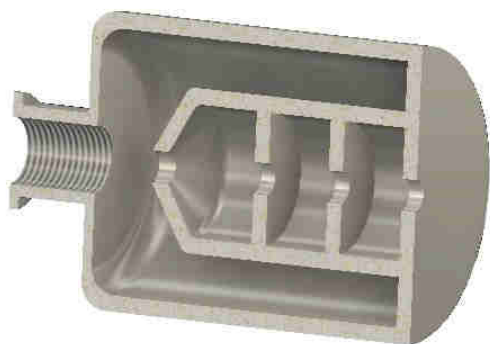
Letící střela v tomto případě funguje jako určitá zátka, díky které značná část plynů směřuje do komory 1. Zde se nachází struktura, která uvede proudící plyny do silného turbulentního proudění, využije se tedy vířivého principu. Možné typy struktur pro tento prostor jsou uvedeny v kapitole 4.2. Komora 2 může být využita jako expanzní tlumič s přepážkami, v tom případě by bylo zařízení současně dobrým tlumičem hluku.

Případně mohou být v tomto prostoru drážky, které mají stejnou funkci jako u zařízení typu Vortex. V tomto případě se jedná o zařízení s výborným tlumením plamene, dobrou kompenzací zpětného rázu i značným tlumením hluku. Kompenzace zdvihu je řešena gradientní změnou hustoty struktury, která způsobí, že do vrchní části komory směřuje více plynů, vytváří tedy větší sílu na čelní plochu, čímž vzniká klopný moment kompenzující zdvih.

Plyny vracející se z komory 1 zpět do hlavně pak napomáhají přebíjení zbraně, zejména při použití subsonického střeliva.



Obr. 4-13 Varianta dvoukomorová



Obr. 4-14 Úprava pro lepší tlumení hluku



Obr. 4-15 Úprava pro lepší tlumení plamene

Tab. 4-6 Souhrn varianty dvoukomorové

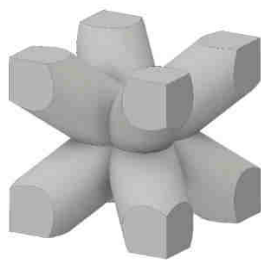
Varianta dvoukomorová	
Princip	Vířivý, expanzní
Redukce zpětného rázu	Lineární
Kompenzace zdvihu	Gradientní struktury
Tlumení hluku	Expanzní
Výhody	Velmi univerzální Možnosti modifikací Konvenčně nevýrobitelné
Nevýhody	Vzhled Zvýšené nároky na pevnost zařízení

4.2 Využitelné struktury

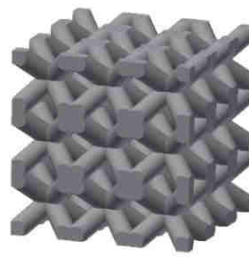
Technologie SLM umožňuje výrobu také strukturovaných dílů, konvenčními technologiemi nevýrobitelných. Jednotlivé struktury jsou tvořeny základními jednotkami (buňkami), které navazují jedna na druhou a tvoří výslednou strukturu. Mezi základní druhy použitelných struktur patří tzv. „lattice“ struktury, skládající se z prutů. Pokročilejším druhem struktur jsou struktury definované matematickými funkcemi.

4.2.1 Prutové struktury

Základní druhy těchto struktur vycházejí z krystalických mřížek kovů, jako je prostorově středěná kubická mřížka (BCC), případně plošně středěná kubická mřížka (FCC). Dále sem patří také různé modifikace těchto základních verzí.

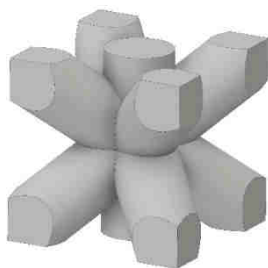


Obr. 4-16 BCC buňka

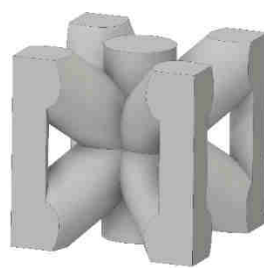


Obr. 4-17 BCC struktura

Tato struktura má ve všech třech základních osách stejnou tuhost a stejné deformační vlastnosti, v případě nutnosti zesílení tuhosti nebo pevnosti v konkrétní ose, je možné přidat prut v požadovaném směru. Tímto vznikne struktura typu BCC-Z.

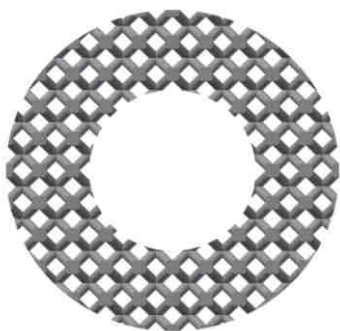


Obr. 4-18 BCC-Z buňka

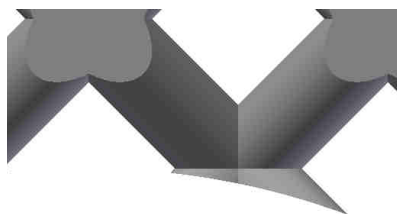


Obr. 4-19 BCC-Z buňka

Nicméně tato varianta není vhodná pro využití u rotačních součástí, pokud dojde k prostému ořezu, vzniknou po hranicích volné pruty. U těchto prutů často dochází k jejich porušení.

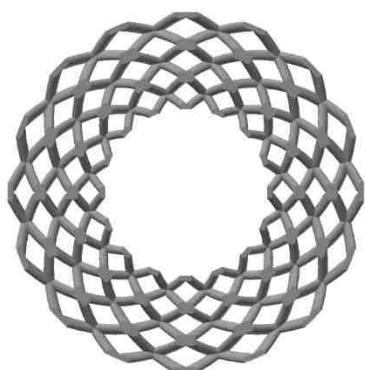


Obr. 4-20 Ořezaná BCC struktura

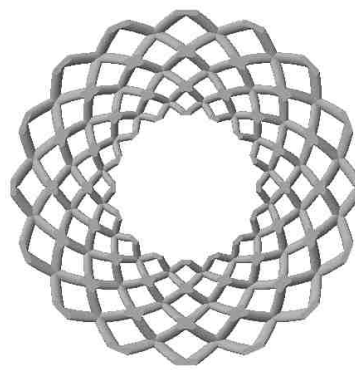


Obr. 4-21 Detail ořezu struktury

Tento nedostatek lze eliminovat vytvořením struktury na kruhové obálce. Při rostoucím průměru však neúměrně narůstá šířka buňky, to se dá kompenzovat gradientně rostoucí výškou původní buňky se zvětšujícím se průměrem.

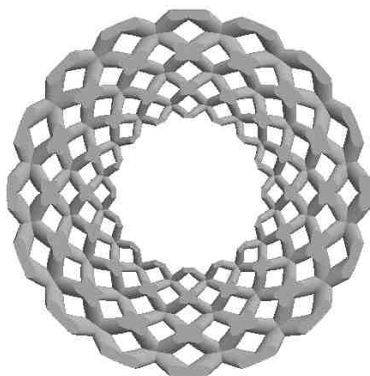


Obr. 4-22 Rotační BCC struktura bez úprav

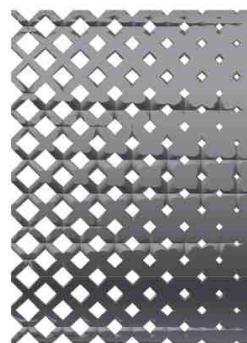


Obr. 4-23 Rotační BCC struktura s gradientní výškou buňky

Gradientní změny jednotlivých parametrů lze využít také k zesílení specifických míst konstruované součásti. Případně lze gradientní změny hustoty využít při kompenzaci zdvihu zbraně.



Obr. 4-24 Gradientní změna průměru prutu



Obr. 4-25 Gradientní změna hustoty struktury

4.2.2 Struktury definované matematickými funkcemi

Struktury definované matematickými funkcemi jsou nejčastěji definované jako druh minimálních povrchů na základě různých definicí. Vybrány byly struktury ze skupiny TPMS („triply periodic minimal surface“) povrchů na základě jejich vlastností.

Vhodné plochy pro vytváření struktur jsou:

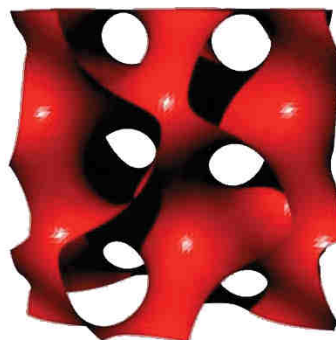
- Gyroid
- Double gyroid
- Diamond
- Lidinoid

Gyroid je definován následující funkcí:

$$\cos(x) \cdot \sin(y) + \cos(y) \cdot \sin(z) + \cos(z) \cdot \sin(x) = 0 \quad (4-1)$$

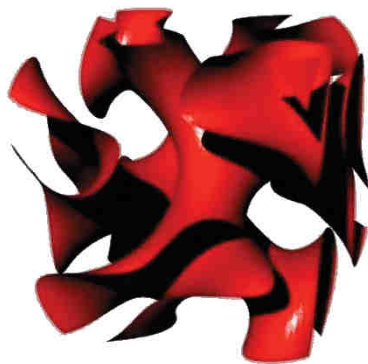


Obr. 4-26 Gyroidní buňka

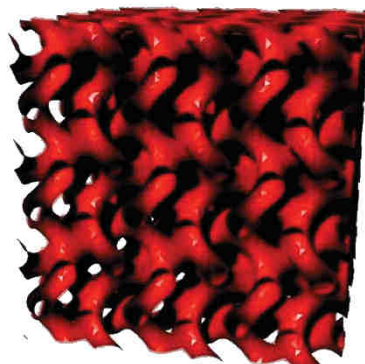


Obr. 4-27 Gyroidní struktura

Double gyroid je modifikace základního gyroidu, kde je plocha zdvojena a přesazena vůči sobě, jedná se tedy o dva samostatné gyroidy propletené do sebe.



Obr. 4-28 Double gyroid buňka



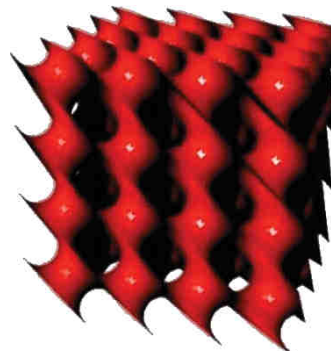
Obr. 4-29 Double gyroid struktura

Diamond je definován následující funkcí:

$$\sin(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(z) + \sin(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \sin(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) = 0 \quad (4-2)$$



Obr. 4-30 Diamond buňka



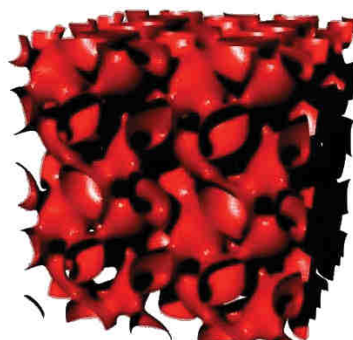
Obr. 4-31 Diamond struktura

Lidinoide je definován následující funkcí:

$$0.5 \cdot (\sin(2 \cdot x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) + \sin(2 \cdot y) \cdot \cos(z) \cdot \sin(x) + \sin(2 \cdot z) \cdot \cos(x) \cdot \sin(y)) - 0.5 \cdot (\cos(2 \cdot x) \cdot \cos(2 \cdot y) + \cos(2 \cdot y) \cdot \cos(2 \cdot z) + \cos(2 \cdot z) \cdot \cos(2 \cdot x)) + 0.15 = 0 \quad (4-3)$$



Obr. 4-32 Lidinoide buňka



Obr. 4-33 Lidinoide struktura

Tyto struktury se vyznačují tím, že mají konstantní zakřivení. Z hlediska výroby technologií SLM jsou výhodné zejména proto, že jsou samonosné (úhel normály vůči základní rovině není větší než 43°).

Jejich využití v rámci konstrukce ústového zařízení spočívá především v ovlivnění proudu plynů. Proudící plyn naráží na plochu, které je vždy zakřivena ve všech třech hlavních osách stejně. Změna směru proudění je tedy pozvolná, což má pozitivní efekt na síly působící na strukturu.

Všechny uvedené struktury je také možné modifikovat, aby se jejich hustota gradientně měnila.

4.3 Zhodnocení koncepcí

Po konzultaci s CZUB byla z koncepčních návrhů vybrána varianta dvoukomorová, a to z důvodu jejího potenciálu pozitivně ovlivnit všechny negativní jevy při výstřelu. Vhodnost struktur bude analyzována porovnávací CFD analýzou, nejvhodnější struktura bude aplikována do primární komory ústového zařízení.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Vnitřní balistika

Vnitřní balistika se zabývá pohybem střely v hlavní. Od okamžiku opuštění hlavně střelou až do okamžiku, kdy střela přestane být urychlována prachovými plyny se jedná o balistiku přechodovou.

Aby bylo možné počítat přechodovou balistiku je potřeba zjistit okrajové podmínky pomocí vnitřní balistiky. Vnitřní balistika byla řešena pomocí programu IntBal 1.0. Tento program řeší rovnice uvedené v normě NATO – STANAG 4367.

5.1.1 Vstupní parametry

Vnitřní balistika byla počítána pro zbraň CZ Bren 2, ráže 7,62x39 s délkou hlavně 8“. Při výpočtu nebyl brán v úvahu pohyb závěru. Vstupní parametry výpočtu jsou uvedeny v tab. 5-1. Většina hodnot byla dodána firmou CZUB, ostatní byly použity z knihovny programu pro ráži 7,62x39.

Tab. 5-1 Vstupní parametry vnitřní balistiky

Název parametru	Hodnota
Počáteční spalovací prostor	$1,95 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
Hmotnost střely	0,008 kg
Dráha střely v hlavní	0,2032 m
Průřez hlavně	$4,73 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$
Stoupání drážkování	240 mm/ot
Počáteční teplota hlavně	20 °C
Hustota hlavně	7860 kg/m ³
Tepelná kapacita hlavně	460 J/kg*K
Koeficient volného prostupu tepla	11,35 W/m ² *K
Hmotnost prachové náplně	0,0017 kg
Měrná energie prachové náplně	1018000 J/kg
Výbuchové teplo prachové náplně	3680 °K
Hustota prachové náplně	1490 kg/m ³
Poissonova konstanta prachové náplně	1,238
Koeficient hoření prachové náplně	$4,05 \cdot 10^{-10} \text{ m/s*Pa}$
Exponent hoření prachové náplně	1
Hmotnost zápalky	$5 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$
Měrná energie zápalky	350000 J/kg
Výbuchové teplo zápalky	2500 °K
Poissonova konstanta zápalky	1,215
Tvar zrna	Válec
Průměr zrna	1 mm
Délka zrna	0,14 mm
Velikost kroku ve výpočtu	0,0001 ms

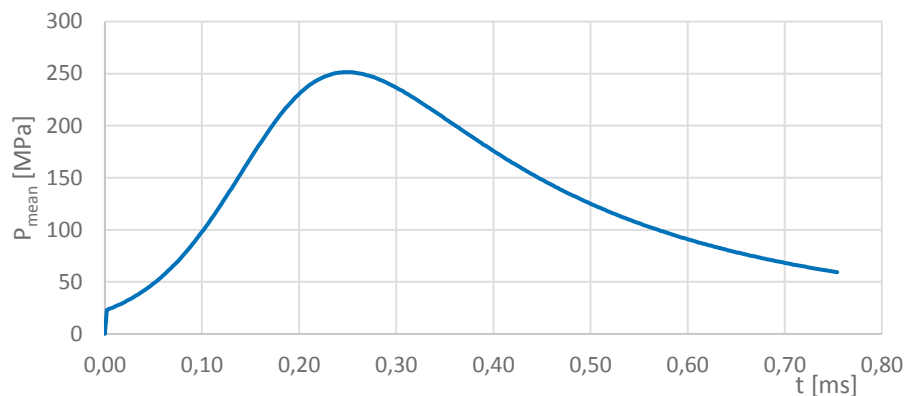
5.1.2 Výsledky vnitřní balistiky

Z hodnot vnitřní balistiky jsou pro další výpočet podstatné:

- Tlak
- Rychlost střely
- Teplota plynů

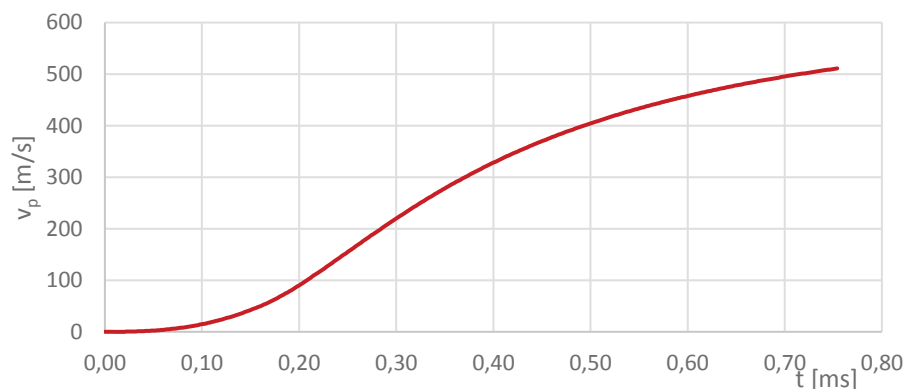
Následující grafy zobrazují závislosti těchto veličin na čase.

Tlak na čase



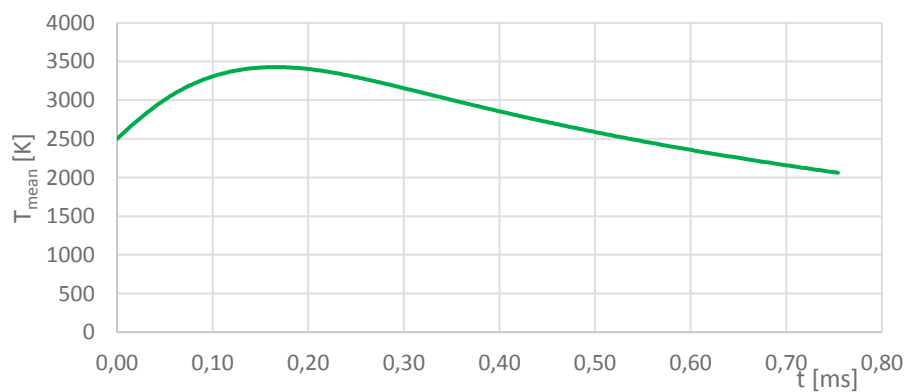
Graf 5-1 Závislost tlaku v hlavni na čase

Rychlost střely na čase



Graf 5-2 Závislost rychlosti střely na čase

Teplota plynů na čase



Graf 5-3 Závislost teploty plynů na čase

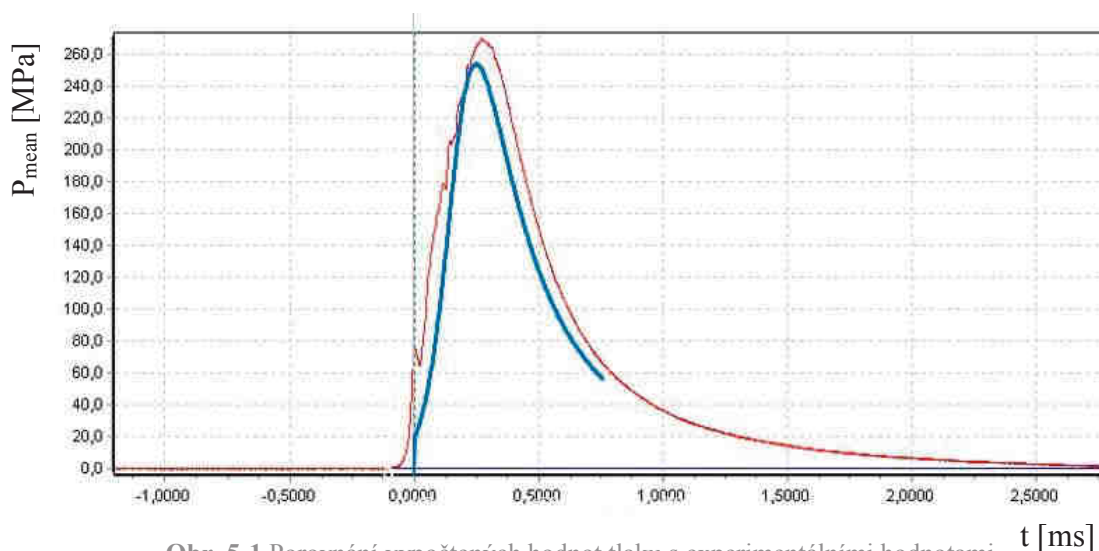
Ostatní grafy jsou uvedeny v příloze 1. Grafy odpovídají předpokládaným průběhům dle teorie. Maximální tlak je stanoven na 251,4 MPa při čase 0,249 ms. Tomuto času odpovídá také inflexní bod v grafu 5-2.

Střela opustí hlavěň při čase 0,754 ms. Hodnoty jednotlivých veličin v tomto čase lze vidět v tab. 5-2.

Tab. 5-2 Hodnoty důležitých veličin při opuštění hlavěň střelou

Veličina	Hodnota
Dráha střely	0,2032 m
Tlak	59,2 MPa
Rychlost střely	511,04 m/s
Teplota plynů	2061,4 °K

Pro ověření správnosti výpočtu byl průběh tlaku porovnán s hodnotami zjištěnými experimentálně, které byly dodány Českou Zbrojovkou. Toto porovnání je na obr. 5-1. Z tohoto porovnání lze předpokládat, že výpočet je správný.



Obr. 5-1 Porovnání vypočtených hodnot tlaku s experimentálními hodnotami

5.2 Generování struktur

Pro účinné využití struktur u dvoukomorové varianty úst'ového zařízení je nutné tyto struktury jednoduše generovat v nějakém programovém prostředí. Aby bylo možné ověřit účinnost těchto struktur také výpočtem, je nutné mít objemový model dané struktury.

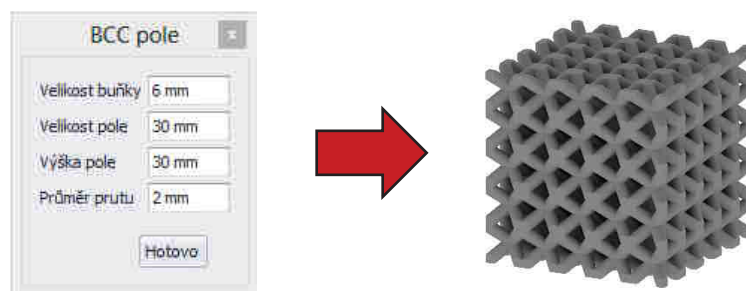
5.2.1 Generování prutových struktur

Pro generování prutových struktur byl využit program Autodesk Inventor 2016. V tomto programu byly vytvořeny parametrické modely základních buněk (BCC, BCC-Z, FCC). Mění se přitom tyto parametry:

- Šířka buňky
- Výška buňky
- Průměr prutu

Je možné zvolit průměr prutu v každé hraně buňky rozdílný, čímž lze vytvořit strukturu gradientní.

Pro vytvoření pole buněk byla vytvořena parametrizovaná sestava s návazností na model základní buňky, kde s pomocí velmi jednoduchého formuláře jde získat výslednou strukturu.



Obr. 5-2 Generování pole BCC buněk

5.2.2 Generování struktur definovaných matematickými funkcemi

Vytváření struktur definovaných matematickými funkcemi je o něco náročnější. Vzhledem k tomu, že matematická funkce popisuje pouze plochu, je potřeba z nich vytvořit objemový model.

Pro stabilní generování struktur, reprezentovaných jako objemové díly byly využity následující programové prostředí:

- Rhinoceros 5.0
- GOM Inspect V8
- Netfab Studio Professional
- Goemagic Design X
- Autodesk Inventor 2016

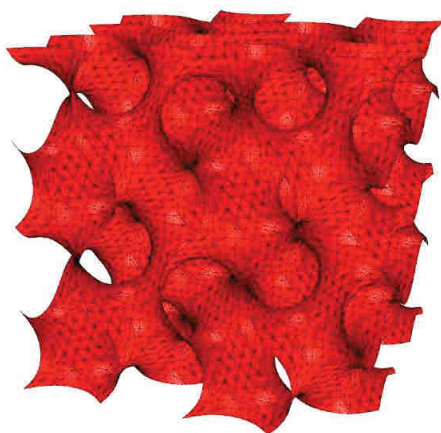
Z matematické funkce je potřeba nejdříve vytvořit plochu. Do programu Rhinoceros je potřeba nainstalovat doplněk Grasshopper. V tomto prostředí je vytvořen script, který dokáže vygenerovat požadované plochy s nastavenou přesností. Script nejdříve vypočítá mračno bodů dle zadané funkce a následně z něj sestaví plochu pomocí

spojení bodů do trojúhelníků. Výsledná plocha tedy odpovídá formátu STL. V rámci scriptu je možné zvolit několik parametrů výsledné plochy:

- Typ plochy (Gyroid, Diamond, Lidinoid, atd.)
- Rozsah počítaných hodnot (standartní buňka má rozsah od 0 do 2π)
- Počet bodů v rozsahu (rozlišení buňky)
- Parametr t
- Velikost buňky
- Počet buněk ve směru osy x
- Počet buněk ve směru osy y
- Počet buněk ve směru osy z

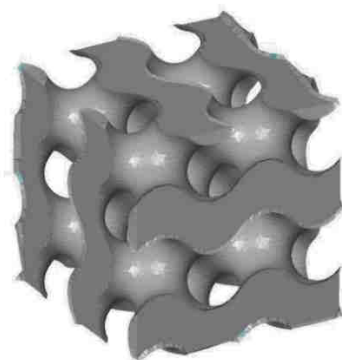
Po správném nastavení scriptu je možné plochu vygenerovat a uložit ve formátu STL. V případě, že je formát STL koncovým formátem, je možné vytvořit přímo výsledné pole struktury. Pokud je potřeba strukturu importovat do programového prostředí například ANSYS, je vhodné vytvořit buňku jen jednu s rozšířenými okraji pro pozdější ořezání.

Výhodou tohoto scriptu je, že změny parametrů lze pozorovat v reálném čase na výsledné struktuře



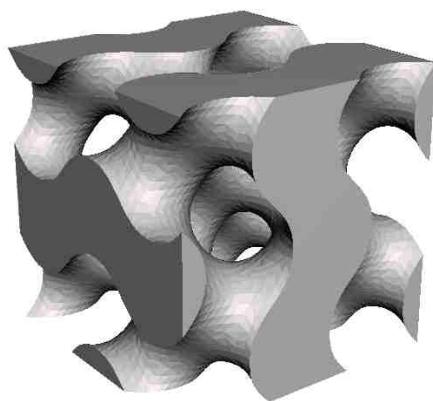
Obr. 5-3 Gyroidní struktura vygenerovaná v programu Rhinoceros

Tato struktura je následně importována do programového prostředí GOM Inspect V8. Zde je potřeba po hranách struktury vytvořit mosty, aby bylo možné geometrii uzavřít. K tomu slouží nástroj „close holes“. Otvory je vhodné uzavřít jako „plane based“. Výsledná struktura je zobrazena na obr. 5-4.



Obr. 5-4 Gyroidní struktura upravená v programu GOM Inspect

Jelikož jsou po této operaci hrany dosti zdeformované, je potřeba strukturu oříznout přesně definovaným tvarem. K tomuto účelu se nejlépe osvědčil program Netfab Studio Professional, kde pomocí booleovských operací získáme požadovaný tvar. Oříznutí lze provést prakticky libovolným tvarem, je tedy možné využít strukturu například jako výplň dutého dílu. Pro samotnou výrobu by byl tento krok posledním, pro získání objemového dílu je však ještě potřeba dané plochy tvořené polygonovou sítí převést na plochy tvořené křivkami. K tomuto účelu je speciálně určen program Goemagic Design X.



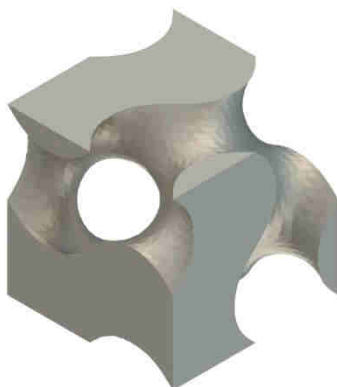
Obr. 5-5 Gyroidní struktura ořezaná v programu Netfab Studio Professional

V programu Goemagic Design X lze využít funkci „Auto Surfacing“. Tato funkce na povrchu polygonové sítě vytvoří body, které následně spojí pomocí křivek. Při nastavení této funkce je důležité, aby dané body byly definovány povrchem, toho se dosáhne zvolením možnosti „Feature Following Network“. Vytvořená síť bodů je pak kvalitnější a má méně chyb. Složitost jednotlivých ploch je potřeba nastavit na nejnížší hodnotu, jinak by výsledná buňka byla definována příliš mnoha body a velikost souboru s touto buňkou by byla příliš velká, také výpočetní náročnost se pak znatelně zvyšuje. Naopak přesnost přichycení bodů ke geometrii (polygonové síti) je potřeba zvolit vysokou, aby byla výsledná plocha blíže původní matematické definici. Po vygenerování bodů a předběžného náhledu ploch, lze vidět, že v okrajích struktury je mnoho defektů. Tyto defekty nejsou příliš důležité, protože posledním krokem je ořezání struktury na velikost přesně jedné buňky. Defekty uvnitř struktury je však potřeba manuálně upravit přesunutím bodů do vhodnějších pozic. Poté je možné nechat vygenerovat výsledné plochy, které se nakonec ještě oříznou pomocí rovin. Tyto roviny mohou zároveň posloužit také pro zalepení vzniklých děr.

Výslednou strukturu je možné exportovat ve formátu STEP.

Tato buňka pak může být libovolně upravována v programu Autodesk Inventor, kde je možné vytvářet pole těchto buněk a následně je spojovat do jedné struktury.

Tímto postupem se dosáhne značného snížení nároků na výkon počítače při další práci s těmito strukturami. Pokud bychom chtěli vytvořit objemový díl z původního STL formátu, při stejné výpočetní náročnosti, byla by geometrie značně zdeformována. Při zachování kvality modelu by se náročnost řádově zvýšila. Například gyroidní buňka v STL formátu obsahuje cca 20000 malých ploch, po převedení programem Geomagic se počet ploch sníží na cca 200, při zachování kvality geometrie.



Obr. 5-6 Výsledná gyroidní buňka

5.2.3 Gradientní změny parametrů struktur

U těchto struktur je možné měnit plynule jejich objemový podíl pomocí malé úpravy původní rovnice (v rovnici 5-1 je jako příklad uvedena rovnice gyroidní struktury). Pokud se parametr t převede na druhou stranu rovnice a vytvoří se závislost na specifické souřadnici, vznikne gradientní struktura. Tato gradientní změna může být lineární, nebo jak je uvedeno v rovnici 5-2 kvadratická. K tomuto členu musí být také přidána konstanta „ a “, která určuje, jak rychle se bude objemový podíl v rámci struktury měnit.

$$\cos(x) \cdot \sin(y) + \cos(y) \cdot \sin(z) + \cos(z) \cdot \sin(x) = t \quad (5-1)$$

$$(\cos(x) \cdot \sin(y) + \cos(y) \cdot \sin(z) + \cos(z) \cdot \sin(x)) - (a \cdot z^2) = b \quad (5-2)$$

Konstanta „ a “ je dána následujícím vztahem:

$$a = \frac{t(z_2)}{z_2^2} \quad (5-3)$$

Kde: a – konstanta změny objemového podílu
 $t(z_2)$ – parametr t v místě z_2
 z_2 – z souřadnice bodu s definovaným parametrem t

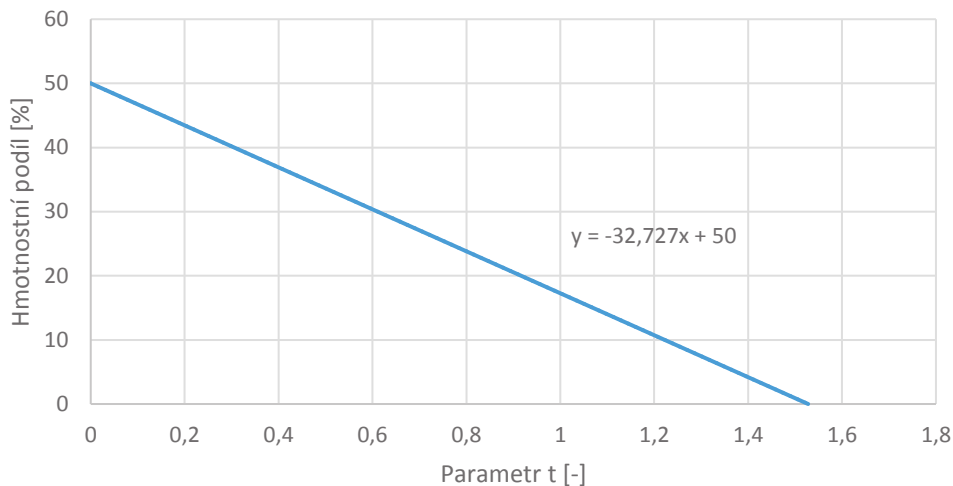
Vztah 7-3 platí, pokud je požadovaný parametr t místě $z = 0$, roven nule. Pokud je vyžadován v tomto místě jiný parametr t , zavede se do rovnice jako konstanta „ b “. V tom případě platí:

$$a = \frac{t(z_2) - b}{z_2^2} \quad (5-4)$$

Kde: a – konstanta změny objemového podílu
 $t(z_2)$ – parametr t v místě z_2
 z_2 – z souřadnice bodu s definovaným parametrem t
 b – požadovaný parametr t v místě $z = 0$

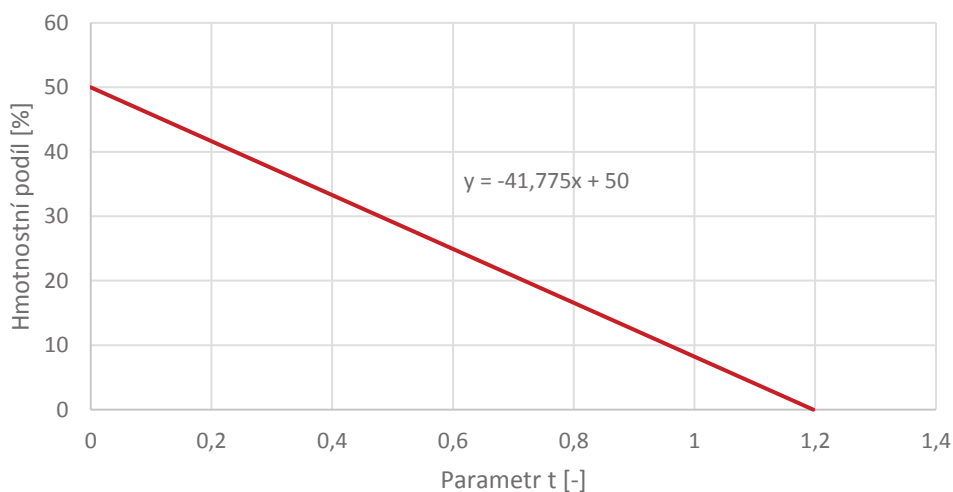
Pro snadnější volbu parametru t byly vypracovány závislosti objemového podílu na tomto parametru pro základní struktury.

Hmotnostní podíl - Gyroid



Graf 5-4 Závislost hmotnostního podílu na parametru t - Gyroid

Hmotnostní podíl - Diamond



Graf 5-5 Závislost hmotnostního podílu na parametru t - Diamond

Pro výpočet parametru t pro gyroidní strukturu pak platí:

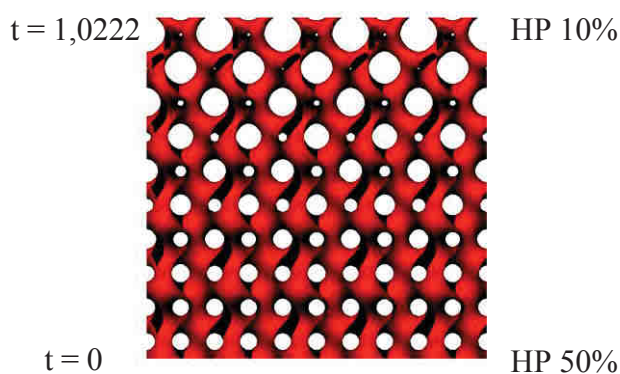
$$t = -\frac{HP-50}{32,727} \quad (5-5)$$

Kde: t – parametr t
 HP – hmotnostní podíl

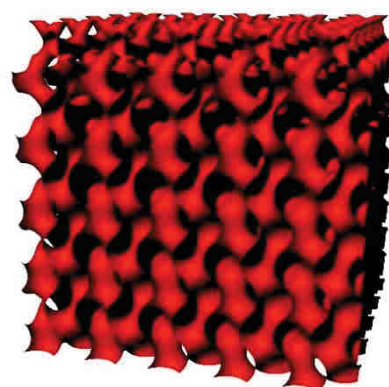
Pro výpočet parametru t pro diamond strukturu pak platí:

$$t = -\frac{HP-50}{41,775} \quad (5-6)$$

Kde: t – parametr t
HP – hmotnostní podíl



Obr. 5-7 Gradientní gyroidní struktura – pohled z boku



Obr. 5-8 Gradientní gyroidní struktura

Pro generování gradientních struktur je využíván program Rhinoceros s nástavbou Grasshopper stejně jako u jednoduchých struktur. Oproti původnímu scriptu není možné využít kopírování jednotlivých buněk do výsledného pole ve směru gradientní změny parametru t . Generování struktury tedy probíhá celé v jedné operaci, což značně prodlužuje výpočetní čas.

Výsledný model struktury je ve formě polygonální sítě a exportuje se do formátu STL. Tyto struktury se dají následně upravovat v programu GOM Inspect a Netfab, kde se dá vytvořit výsledný model pro přípravu dat 3D tisku. Pro analýzu struktury v programovém prostředí ANSYS je však nutné mít objemový model. Pro vytvoření takového modelu by však bylo nutné zpracovat strukturu jako celek v programu Geomagic Design X. Na takto složité struktury již tento postup selhává z důvodu výpočetní náročnosti.

Gradientní struktury je tedy možné účinně generovat pro potřeby 3D tisku, jejich analýza pomocí MKP by však vyžadovala enormní výpočetní výkon.

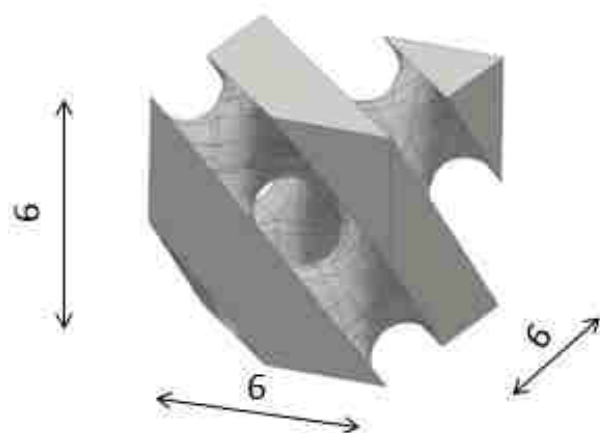
5.3 CFD analýzy vzorků struktur

Aby bylo možné určit která struktura je z hlediska proudění plynů nejvhodnější, byla provedena analýza jednotlivých struktur v programu ANSYS Fluent. Jedná se pouze o porovnávací výpočet s cílem určit nejvýhodnější strukturu z hlediska proudění, nikoliv přesné hodnoty veličin v rámci struktury.

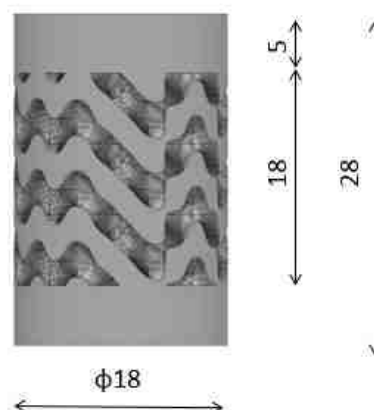
5.3.1 Vzorek

Pro zjednodušení výpočtu byla zvolena geometrie vzorku, která reprezentuje válcové těleso s jeho nejbližším okolím.

Velikost buňky byla zvolena na 6 mm s ohledem na výrobní možnosti technologie SLM.



Obr. 5-9 Buňka pro vzorky na CFD



Obr. 5-10 Rozměry vzorku pro CFD

Rozměry simulované struktury byly zvoleny jako válec o průměru 18 mm a délky 18 mm. Výslednou geometrii je potřeba invertovat, aby model obsahoval pouze prostor, kterým může plyn proudit. V případě gyroidních a diamondových struktur s parametrem $t = 0$, není nutná inverze, jelikož by byla výsledkem tatáž geometrie. Před strukturou a za ní je vytvořen přívod/odvod plynu v délce 5 mm.

Aby bylo možné vzorky mezi sebou objektivně porovnávat, je potřeba zajistit jednotnou velikost buňky a také její hmotnost.

Simulované struktury jsou:

- BCC prutová struktura
- Gyroid
- Diamond

Hmotnostní podíl pro gyroidní a diamondovou strukturu byl zvolen 50 %.

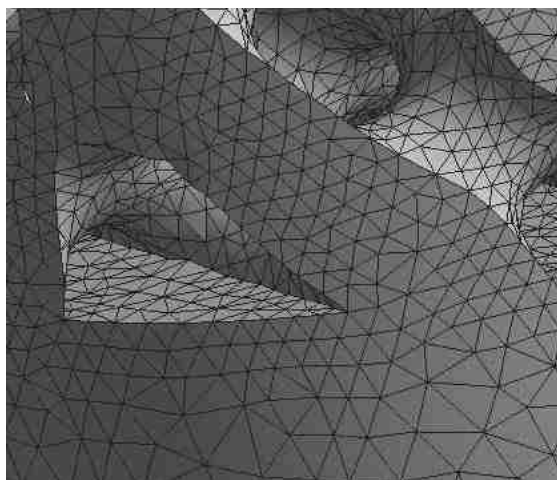
Geometrie je importována do programu ANSYS ve formátu STEP, po importu je nutné nadefinovat danou geometrii jako tekutinu, zvolením typu na „fluid“.

5.3.2 Nastavení sítě

Program ANSYS Fluent v akademické verzi dovolí počítat pouze vzorky s maximálním počtem elementů 512 000. Je tedy nutné volit nastavení prvků tak, aby byla tato podmínka splněna. Tomuto kritériu odpovídá minimální velikost prvku 0,35 mm a maximální 1 mm, při automatickém zjemňování sítě softwarem. Výsledná síť je zobrazena na obr. 5-11 a 5-12.



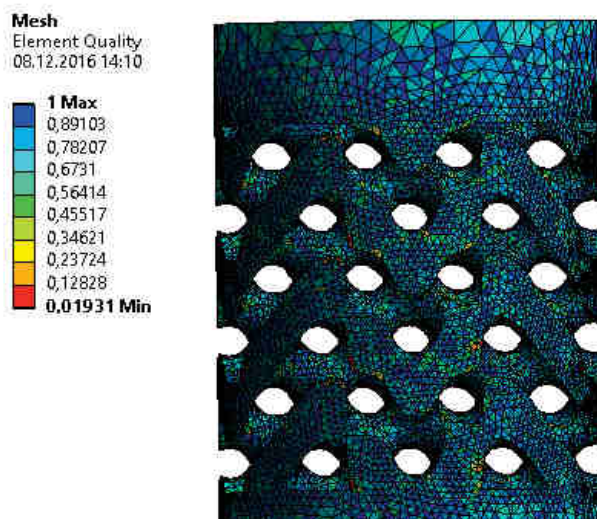
Obr. 5-11 Síť pro vzorek na CFD



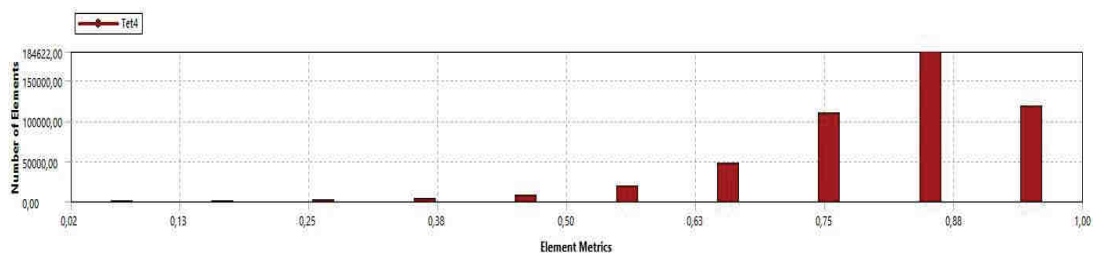
Obr. 5-12 Detail sítě

Pro správnost výpočtu je potřeba zkontrolovat také kvalitu vygenerované sítě, čím blíže je referenční hodnota kvality sítě blíže 1, tím jsou výsledky přesnější.

Na obr. 5-13 je zobrazena kvalita sítě na vzorku s diamantovou strukturou, tato kvalita je pro výpočet dostatečná. Na obr. 5-14 lze vidět histogram kvality elementů.

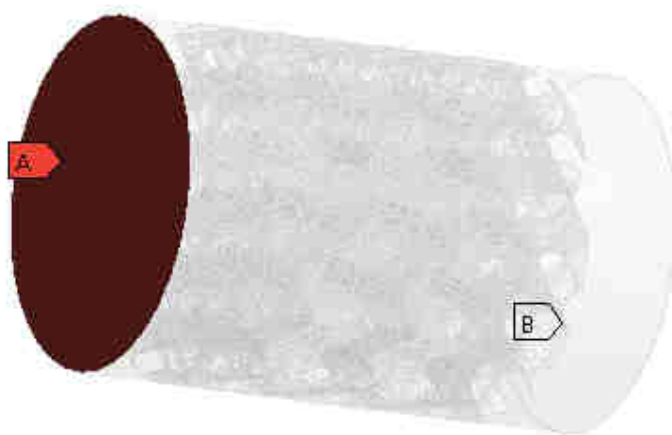


Obr. 5-13 Kvalita sítě



Obr. 5-14 Histogram kvality sítě

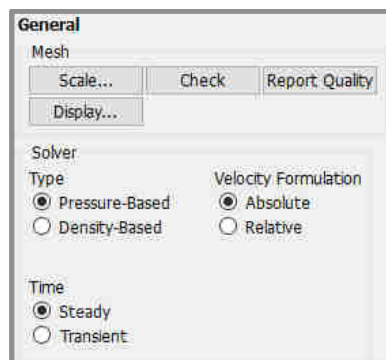
U nastavení sítě je také nutné označit plochy které budou sloužit jako okrajové podmínky v další analýze. V tomto případě se jedná o podstavu a vrchní plochu vzorku, kde jedna bude sloužit jako vstupní okrajová podmínka, druhá bude reprezentovat výstup plynu. Plochy je vhodné označit anglickými názvy „inlet“ a „outlet“, program při načítání sítě automaticky přiřadí těmto plochám odpovídající okrajové podmínky. Při použití jiných názvů je okrajová podmínka automaticky nastavena na tuhou stěnu a musí se následně ručně předefinovat.



Obr. 5-15 Označení ploch jako okrajových podmínek

5.3.3 Nastavení programu ANSYS Fluent

Pro dosažení relevantních výsledků je potřeba správně nastavit výpočetní řešič. V rámci obecného nastavení byl zvolen řešič typu „Pressure based“ jelikož je pro tento výpočet důležitější tlak a rychlost nežli hustota výsledných plynů. Rychlost je během výpočtu formulována absolutně, aby se zabránilo případnému řetězení chyb během jednotlivých iteračních kroků. Pro danou aplikaci struktur by bylo vhodnější využít proudění proměnného v čase. Při odlaďování výpočetního modelu však docházelo k silným divergencím, a to již v počátečních fázích výpočtu. Náročnost na výpočetní výkon také skokově narůstal. Z těchto důvodů byly analýzy pro účely porovnání vhodnosti jednotlivých struktur počítány jako ustálené proudění (tzv. „time-steady“).



Obr. 5-16 Ukázka obecného nastavení programu ANSYS Fluent

Z hlediska výpočetních modelů byly aktivovány pouze rovnice pro zachování energií a turbulentní model. Pro výpočet v rámci vzorků není nutné uvažovat s přenosem tepla do struktury a okolí a také není sledováno mísení jednotlivých plynů. Tyto modely proto nebyly uvažovány.

Turbulentní modely byly uvažovány dva, prvním je v CFD analýzách nejčastěji využívaný model $k-\epsilon$, jedná se o dvourovnicový model založený na Reynoldsově průměrování Navier Stokesových rovnic (RANS). Model byl nastaven jako realizovatelný, korekce v blízkosti stěn byly zvoleny jako „scalable“. Konstanty použité v modelu jsou zobrazeny v tab. 5-3. Do modelu nebyly přidány žádné uživatelsky definované funkce.

Tab. 5-3 Konstanty pro turbulentní model $k-\epsilon$

Název	Hodnota
C2-Epsilon	1,9
TKE Prandtlovo číslo	1
TDR Prandtlovo číslo	1,2
Prandtlovo číslo pro energii	0,85
Prandtlovo číslo podél stěn	0,85

Druhým je pak Reynoldsův model napětí, který dokáže simulovat proudění se zahrnutím anizotropie turbulence. Závislost tlaku na přetvoření byla použita lineární, korekce v blízkosti stěn byly také zvoleny jako „scalable“. Použité konstanty jsou uvedeny v tabulce 5-4. Nejsou uvažovány žádné uživatelské funkce.

Dva modely byly zvoleny pro zjištění jejich vlivu na vhodnost struktury pro absorpci energie proudění.

Tab. 5-4 Konstanty pro turbulentní model Reynoldsova napětí

Název	Hodnota
CMu	0,09
C1-Epsilon	1,44
C2-Epsilon	1,92
C1-PS	1,8
C2-PS	0,6
C1'-PS	0,5
C2'-PS	0,3

TKE Prandtlovo číslo	1
TDR Prandtlovo číslo	1,3
Prandtlovo číslo pro energii	0,85
Prandtlovo číslo podél stěn	0,85

Proudící plyn byl uvažován jako nestlačitelný vzduch z databáze materiálů programu Ansys Fluent. Uvažované konstanty jsou uvedeny v tabulce 5-5.

Okrajová podmínka pro vstup plynu byla zvolena typu „velocity inlet“ se vstupní rychlostí 600 m/s. Smysl působení rychlostní je definován normálou plochy, na kterou je okrajová podmínka aplikována, v tomto případě směrem do sktruktury vzorku. Konstanty ovlivňující turbulence při této podmínce byly ponechány v základním nastavení.

Okrajová podmínka pro výstup plynu je definována jako „pressure outlet“ s okolním atmosférickým tlakem. Konstanty pro turbulence byly opět ponechány v základním nastavení.

Ostatní plochy jsou definovány jako „wall“ bez dalších vlastností, neodvádí tedy teplo a jsou dokonalé tuhé. Podél stěn je zamezeno pohybu plynů a rychlost prodění u stěn je tedy vždy nulová.

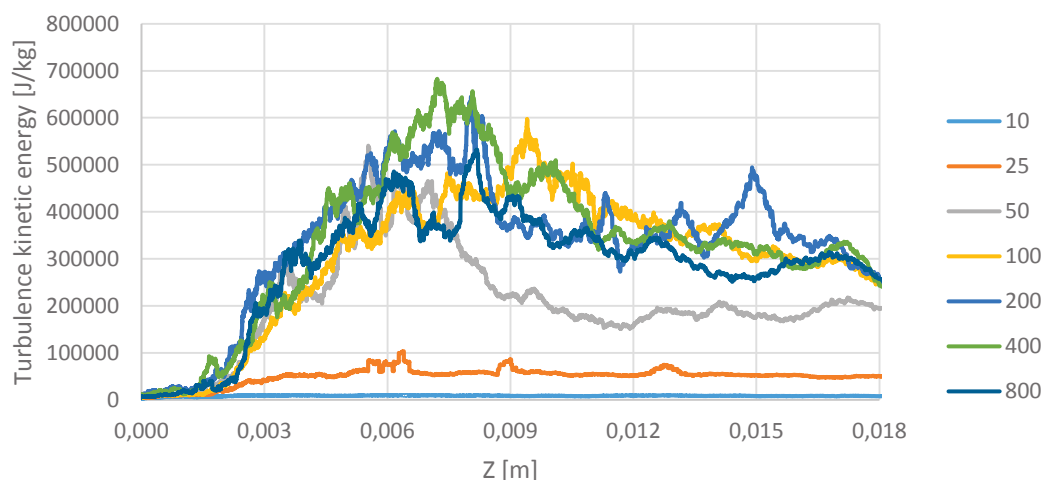
Metoda řešení byla zvolena jako „SIMPLE“, konstanty pro řízení výpočtu a limity pro jeho zastavení byly ponechány v základním nastavení.

Tab. 5-5 Vlastnosti vzduchu z databáze programu Ansys Fluent

Veličina	Hodnota
Hustota	1,225 kg/m ³
Měrná tepelná kapacita	1006,43 J/kg.K
Tepelná vodivost	0,0242 W/m.K
Dynamická viskozita	0,000017894 Pa.s

Byl také analyzován vliv počtu iterací na výsledek. Výpočet byl proveden několikrát s výše uvedeným nastavením a různými počty iterací. Sledován byl především vliv na výsledné hodnoty kinetické energie turbulencí. Z grafu 5-6 vyplývá že při počtu iterací 10, 25 a 50 jsou výsledky dosti rozdílné. Od 100 iterací se již výsledky příliš neliší, proto byl počet iterací pro analýzu struktur zvolen 200, aby bylo jisté, že se tímto parametrem nevnaší do výpočtu příliš velká chyba.

Závislost k na počtu iterací

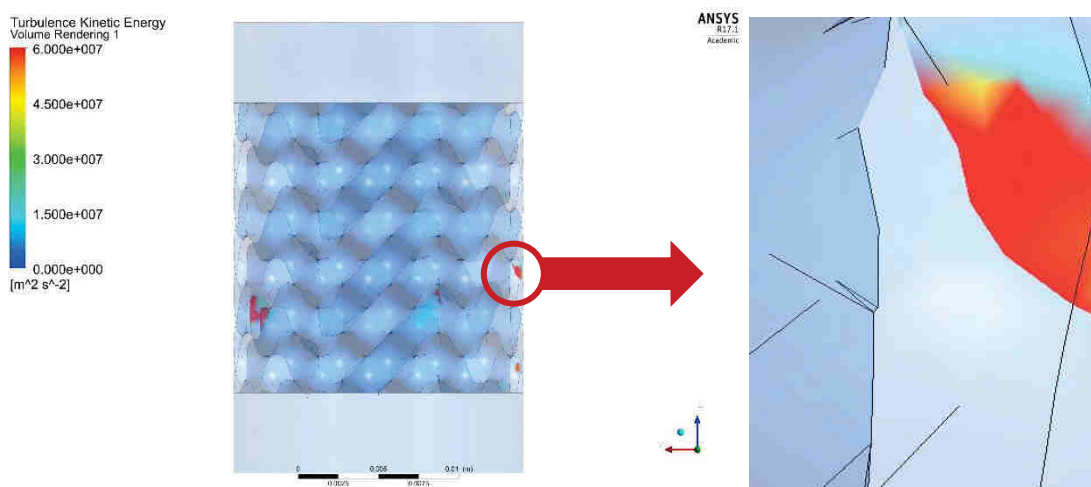


Graf 5-6 Distribuce kinetické energie turbulencí podél vzorku při různém počtu iterací

5.3.4 Výsledky CFD analýz vzorků

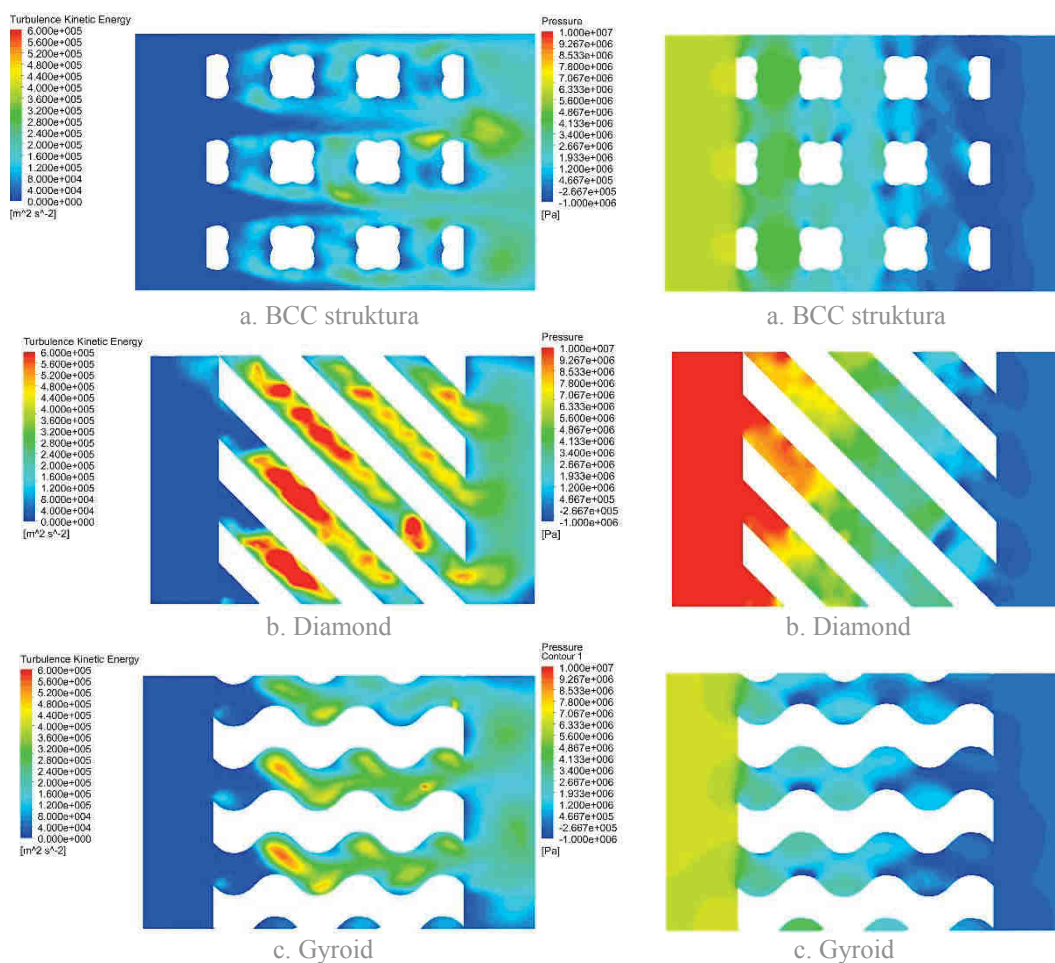
Aby bylo možné využít v úst'ovém zařízení vířivého principu tlumení, je nutné uvést plyny do co nejsilnějšího turbulentního proudění. V rámci analýz je proto sledovaným parametrem hodnota kinetické energie turbulencí a její distribuce ve vzorku.

Během výpočtu se objevovaly v síti uzly, u kterých došlo k chybně vypočítaným hodnotám z důvodu zacyklení výpočtu na těchto uzlech (tzv. exceeded points). Hodnoty kinetické energie turbulencí v těchto bodech pak vykazovaly hodnoty i o 5 řádů vyšší než nevyšší hodnoty ve vzorku. Hodnoty rychlosti proudění dosahovaly řádově statisíce m/s. Tyto evidentně chybné hodnoty byly vyřazeny z následného zpracování. Tyto chyby by bylo možné eliminovat jemnější konečnoprvkovou sítí, z důvodů omezení počtu prvků dostupnou licencí programu však tento postup nelze aplikovat.



Obr. 5-17 Chybné uzly ve vzorku struktury

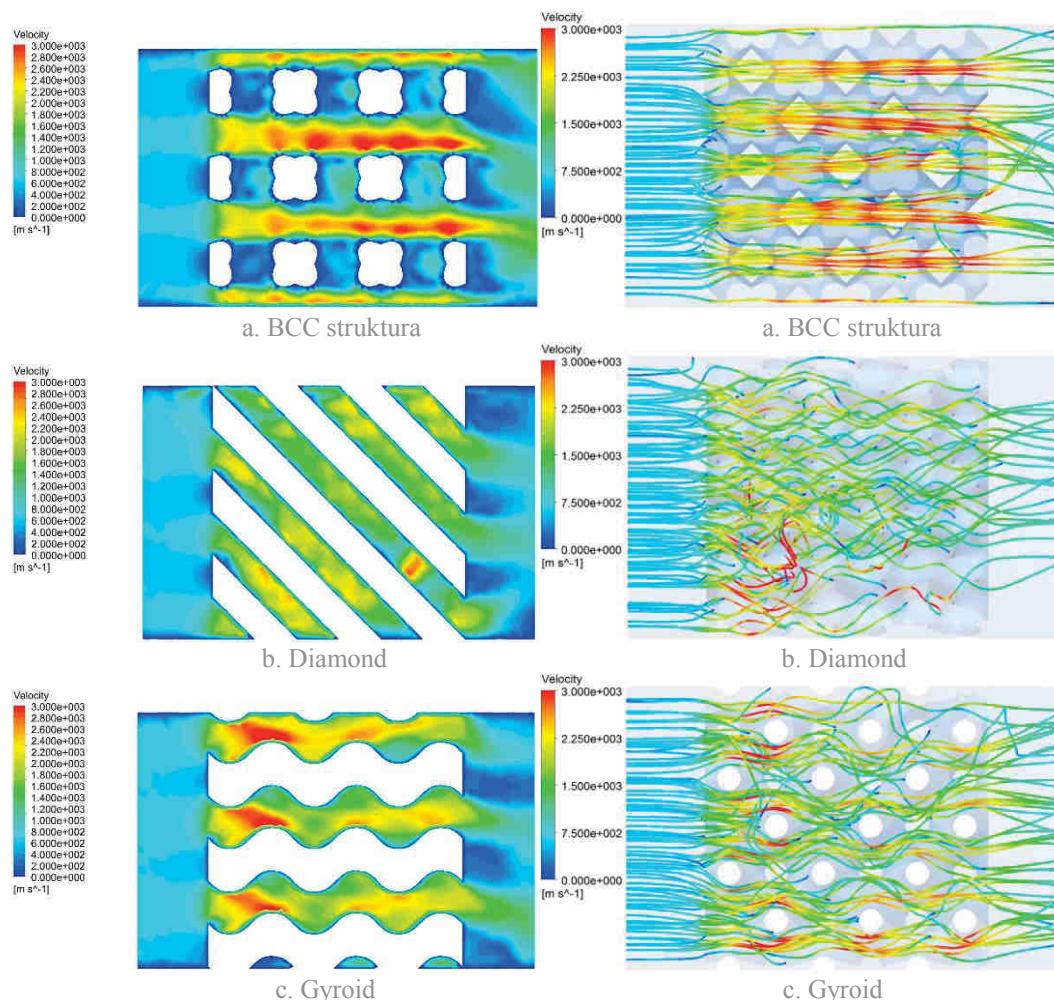
Výsledky jednotlivých simulací při použití turbulentního modelu k- ϵ jsou zobrazeny pomocí řezu středem struktury na obr. 5-18 až 5-20.



Obr. 5-18 Turbulentní kinetická energie

Obr. 5-19 Tlak plynů

Z obrázků je patrné, že hodnoty kinetické energie turbulencí jsou z uvažovaných struktur největší v struktury typu Diamond, jeví se tedy jako vhodnější pro použití v ústřovém zařízení. Z rozložení tlaků podél vzorku vyplývá, že BCC struktura a gyroidní struktura mají nižší hodnoty tlaku ve vstupní oblasti, je tedy předpoklad, že by začátek struktury byl méně namáhán a byly by tak sníženy nároky na pevnost. Jedná se však pouze o řez vzorkem, pro vyhodnocení vhodnosti struktury je nutné zohlednit průběh jednotlivých veličin v celém objemu vzorku.



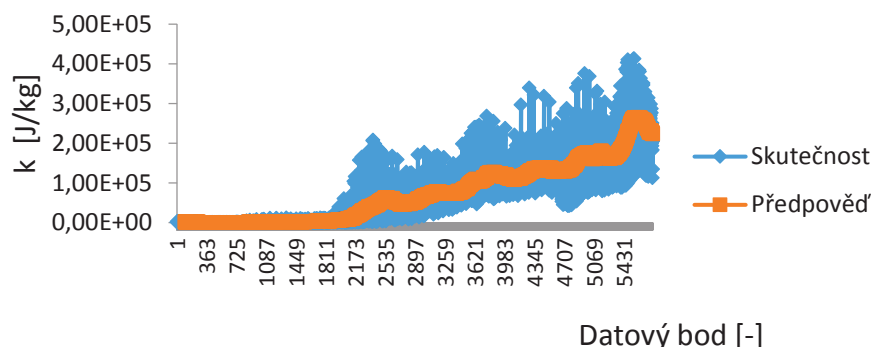
Obr. 5-20 Rychlost proudění plynů

Obr. 5-21 Proudnice plynů

Z rozložení rychlostí proudění (obr. 5-20) je patrné, že nejnižších hodnot dosahuje u vzorku se strukturou typu Diamond. Tyto nižší hodnoty mohou být způsobeny přeměnou kinetické energie na kinetickou energii turbulencí, jak ukazuje obr. 5-18. Rozložení rychlostí je u tohoto vzorku také nejrovnoměrnější z analyzovaných variant. Na obr. 5-21 jsou zobrazeny proudnice ustáleného proudění, jejich barevné spektrum odpovídá rychlosti proudění v daném místě. Celkem je zobrazeno 100 proudnic rovnoměrně rozložených na vstupní plochu, proudnice jsou tedy prostorové a obrázek je pohledem zboku. Ideální struktura by měla mít na výstupní ploše co nejméně proudnic a ty, které jsou ukončeny uvnitř vzorku by měly být co nejrovnoměrněji rozloženy. Těmto podmínkám odpovídá nejlépe vzorek na obr. 5-21 b.

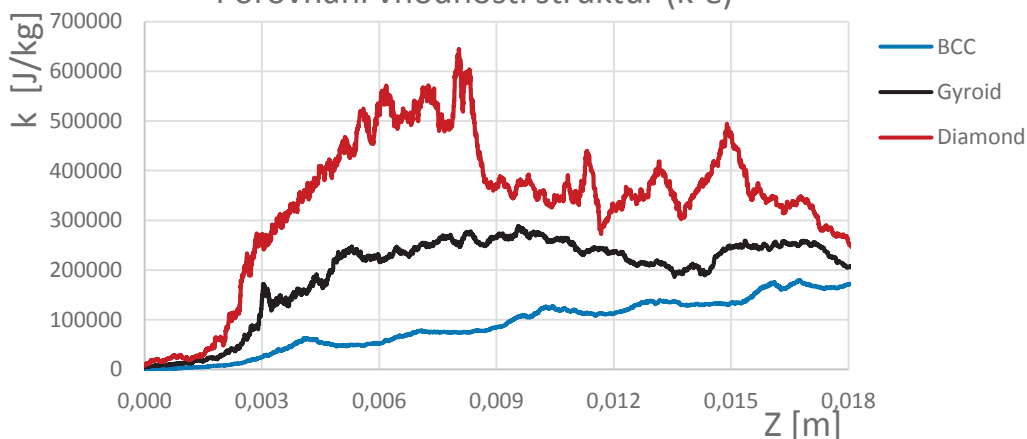
Aby bylo možné vhodnost struktury pro danou aplikaci kvantifikovat, byl stanoven postup pro vyhodnocení na základě kinetické energie turbulencí. Byly uvažovány hodnoty této energie podél proudnic, tímto postupem vzniklo 100 křivek v závislosti na souřadnici z . Tyto křivky byly následně ořezány limitní hodnotou $1e7$ J/kg, čímž došlo k odfiltrování chybných bodů ve výpočtu („exceeded points“). Následně byly hodnoty zprůměrovány pomocí klouzavého průměru, tímto vznikne jedna střední křivka závislosti kinetické energie turbulence na souřadnici z . Výchozí data a následně zprůměrované hodnoty jsou zobrazeny v grafu 5-7.

Klouzavý průměr pro BCC strukturu

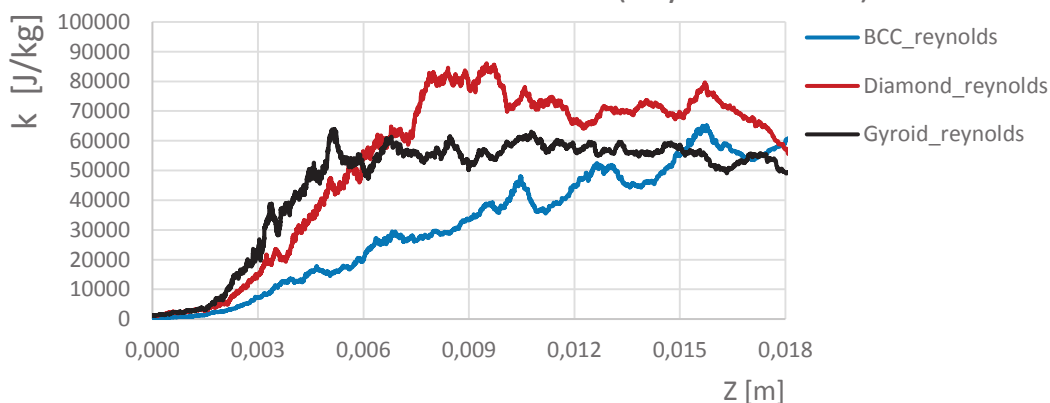


Graf 5-7 Klouzavý průměr pro BCC strukturu

Tento postup byl aplikován pro všechny uvažované struktury, a to při turbulentním modelu $k-\epsilon$ i při modelu Reynoldsova napětí. Jak lze vidět na grafech 5-8 a 5-9, nejvhodnější strukturou je v obou případech struktura typu Diamond. Pro aplikaci v ústovém zařízení je zapotřebí, aby bylo co největší množství kinetické energie přeměněno na kinetickou energii turbulencí, tím dojde k poklesu rychlosti proudění a také rozložení tlakové vlny na delší časový úsek.

Porovnání vhodnosti struktur ($k-\epsilon$)Graf 5-8 Distribuce kinetické energie turbulencí podél vzorku pro různé struktury ($k-\epsilon$)

Porovnání vhodnosti struktur (Reynolds stress)



Graf 5-9 Distribuce kinetické energie turbulencí podél vzorku pro různé struktury

5.4 Optimalizace parametrů struktury

Vybraná struktura typu Diamond patří do skupiny matematicky definovaných struktur, nabízí tedy možnost změny některých parametrů, díky kterým je možné strukturu dále optimalizovat pro specifické aplikace.

5.4.1 Optimalizované parametry

Z možných parametrů byly zvoleny pro optimalizaci takové, které mají největší potenciál ovlivnit proudění plynů. Optimalizovanými parametry jsou:

- Parametr t (hmotnostní podíl)
- Velikost buňky

Parametr t má přímou lineární závislost s hmotnostním podílem, která byla zobrazena v grafu 5-5 v kapitole 5.2.3. V rovnici se pak nachází na její pravé straně a má výchozí hodnotu 0. Maximální teoretická hodnota je 1,1969, kdy je hmotnostní podíl roven 0. V praxi je ovšem použitelný maximální parametr $t = 0,97$, při vyšších hodnotách se již struktura rozpadne na spoustu malých dílů.

Při invertování výsledné struktury je možné docílit i záporného parametru až do objemového podílu 100 %, tyto hodnoty však nebyly uvažovány, jelikož při velkých objemových podílech již nezůstává žádný prostor pro proudění plynů.

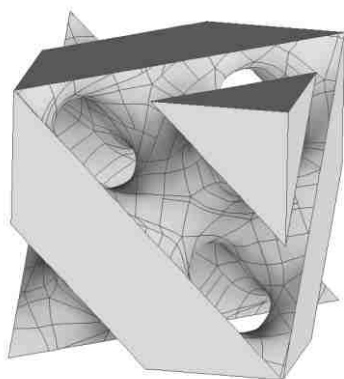
Tab. 5-6 Analyzované hodnoty parametru t

Analyzované hodnoty parametru t [-]					
0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7

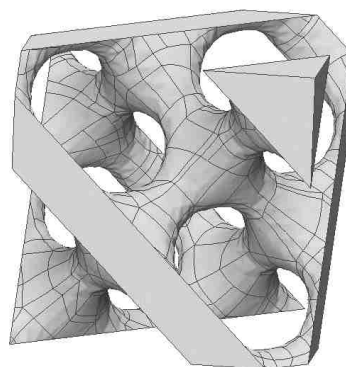
Druhým optimalizovaným parametrem je velikost základní buňky. Z hlediska výrobní technologie SLM je možné uvažovat minimální velikost buňky od přibližně 5 mm. Maximální uvažovaná velikost buňky je definována geometrií dvoukomorové varianty univerzálního ústředního zařízení, kde vyplňovaný prostor má šířku 9 mm. V tomto prostoru by měla být alespoň jedna celá buňka.

Tab. 5-7 Analyzované velikosti základní buňky

Analyzované velikosti základní buňky [mm]				
5	6	8	9	10



Obr. 5-22 Parametr $t = 0$



Obr. 5-23 Parametr $t = 0,7$

5.4.2 Nastavení programu ANSYS Fluent

Geometrie vzorku zůstala zachována jako u analýz struktur, jedná se tedy stále o vzorek o průměru 18 mm a délky 28 mm. Při analýze vlivu velikosti buňky byl parametr t zvolen ve výchozím stavu, tedy nulový. U analýz vlivu parametru t byla velikost buňky zvolena 6 mm.

Nastavení konečnoprvkové sítě zůstalo také stejné, až na vzorek s velikostí buňky 5 mm. Tato struktura byla jemnější a počet prvků překročil hranici licence, minimální velikost prvku byla zvětšena na 0,4 mm a maximální velikost na 1 mm.

Pro zrychlení výpočtu byla využita možnost využít distribuce výpočtu na více procesorových jader počítače. Využita byla vždy 3 jádra ze 4 možných, aby se zamezilo nechtěnému zavírání aplikací běžících na pozadí.

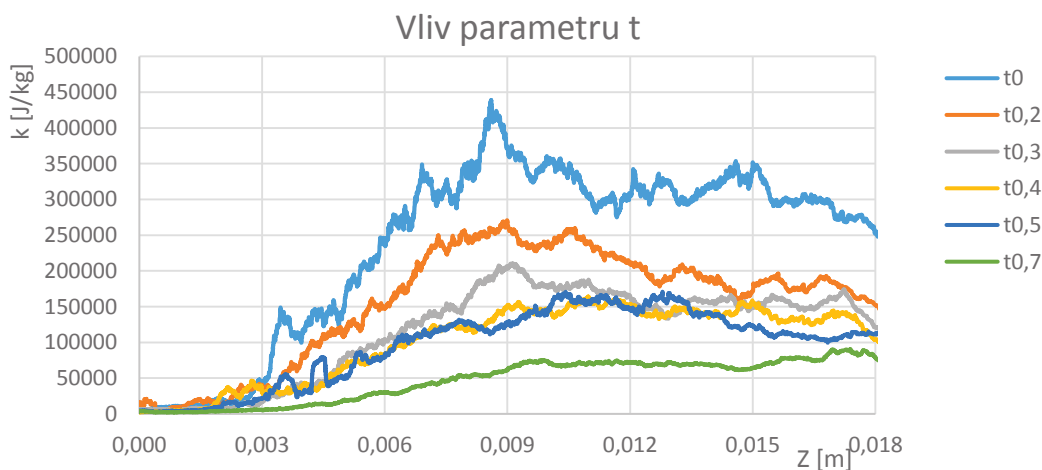
Nastavení řešiče zůstalo beze změny, stejně tak okrajové podmínky a počet iterací výpočtu. Turbulentní model byl již použit jen jeden, a to model k - ϵ pro jeho nižší výpočetní náročnost.

5.4.3 Výsledky optimalizace parametrů

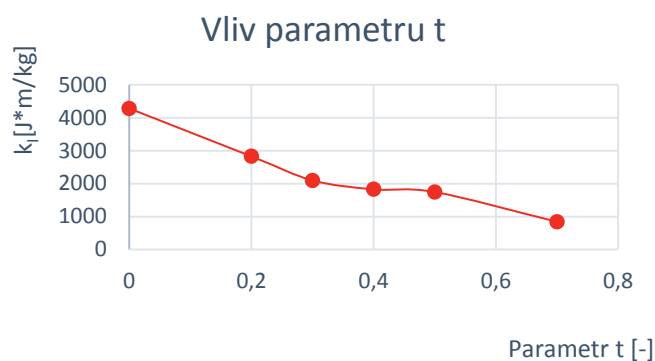
Z těchto analýz byly sestaveny grafy jednotlivých vlivů na kinetickou energii turbulencí obdobně jako v kapitole 5.3.4. Z grafu 5-10 vyplývá, že více kinetické energie je přeměněno na kinetickou energii turbulencí v případě nižších parametrů t , potažmo větších hmotnostních podílů. Pro lepší znázornění byly pomocí integrace spočítány plochy pod jednotlivými křivkami a zaneseny do grafu 5-11.

$$k_I = \int_{z_0}^{z_1} k \, dZ \quad (5-6)$$

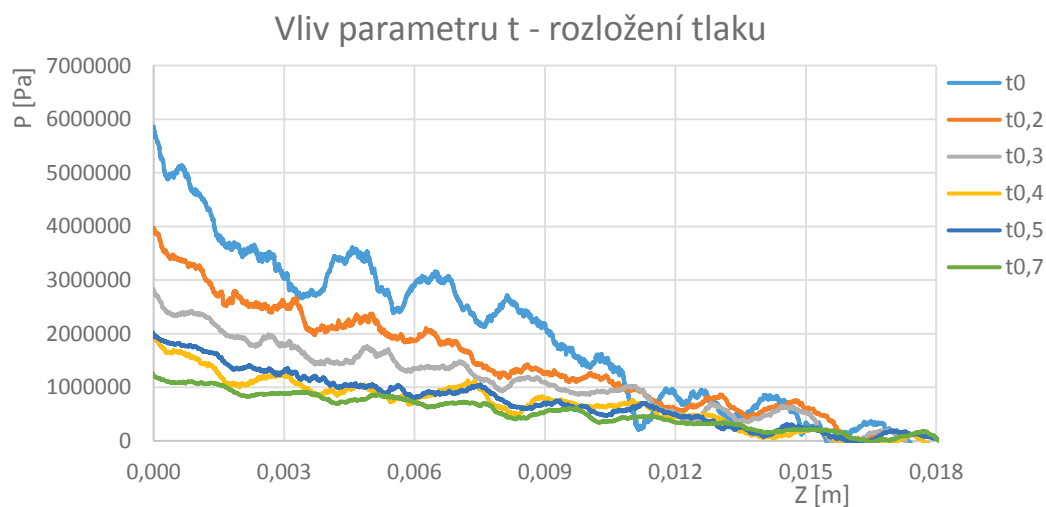
Dále bylo vyhodnocováno rozložení tlaků podél vzorku pro jednotlivé parametry t . V ideálním případě by měl být tlakový gradient co nejnižší. Z grafu 5-12 vyplývá, že nejmenšího tlakového spádu je dosaženo při vyšších parametrech t , respektive menších hmotnostních podílech. Vyšší tlakové spády vytvářejí vyšší nároky na pevnost struktury. Z předběžných pevnostních výpočtů vyplynulo, že i při použití nulového parametru t je pevnost pro danou aplikaci dostatečná. Z tohoto důvodu byl zvolen parametr $t = 0$, jelikož nabízí optimální vlastnosti z hlediska proudění plynů.



Graf 5-10 Vliv parametru t na kinetickou energii turbulencí

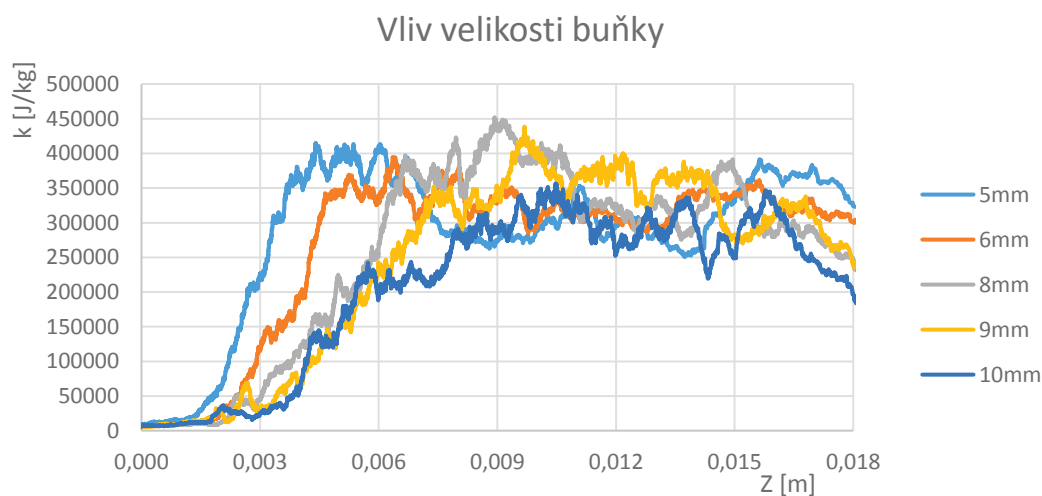


Graf 5-11 Integrace kinetické energie turbulencí pro různé parametry t

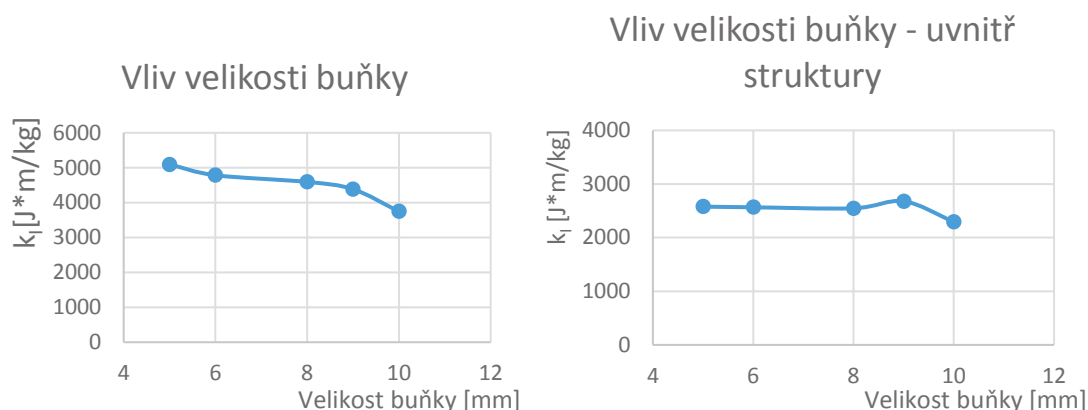


Graf 5-12 Vliv parametru t na rozložení tlaku

Vliv velikosti základní buňky struktury na kinetickou energii turbulencí je zobrazen v grafu 5-13. Plochy pod jednotlivými křivkami jsou zobrazeny v grafu 5-14 a, graf 5-14 b pak zobrazuje plochy pod křivkami po odfiltrování první vrstvy buněk. Bylo zjištěno, že velikost buňky má zásadní vliv pouze v oblasti první řady buněk ve struktuře. Výsledná velikost buňky byla tedy zvolena 9 mm, aby byla ve vyplňovaném prostoru alespoň jedna celá buňka.



Graf 5-13 Vliv velikosti buňky na kinetickou energii turbulencí



Graf 5-14 a, b Integrace kinetické energie turbulencí pro velikosti buňky

Výsledná optimalizovaná struktura má tyto parametry:

- Typ struktury: Diamond
- Velikost základní buňky 9 mm
- Parametr $t = 0$
- Hmotnostní podíl 50%

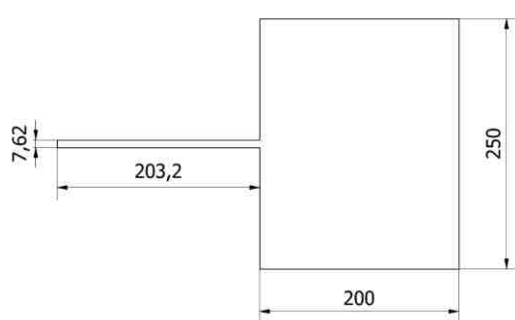
5.5 CFD analýzy samotných zařízení

Pro optimalizaci geometrie bylo nutné ověřit funkci zařízení pomocí CFD analýz. Do těchto analýz nebyla zahrnuta geometrie struktur z důvodu velké výpočetní náročnosti. Analyzovány byly tedy varianty s prázdným prostorem pro strukturu, v případě výpočtu zatížení zařízení byla struktura nahrazena přepážkami se stejným objemovým podílem.

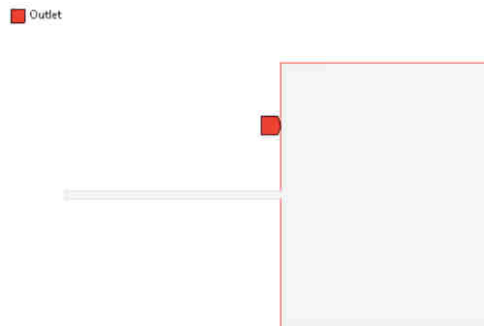
5.5.1 Nastavení CFD analýzy

Pro odladění výpočetního modelu byl využíván jednoduchý 2D model hlavně a okolního prostoru. Postup, kdy byly veličiny na ústí hlavně řízeny v čase jako okrajová podmínka na základě vnitřní balistiky se neosvědčil. V tomto případě bylo extrémně náročné nastavit, aby množství energie dodávané okrajovou podmínkou do systému odpovídalo předpokladům. Byl proto zvolen jiný postup, kdy byla namodelována celá hlaveň a stav jednotlivých veličin byl zadán pouze pro čas $t = 0$ s. V tomto případě nebyla okrajovými podmínkami dodávána žádná další energie a byl sledován pouze vývoj z počátečního stavu do stabilního.

Uvažovaná geometrie je zobrazena na obrázku 5-24. Velikost hlavně odpovídá ráži 7,62x39 mm a délka hlavně je 8". Okolí je uvažováno o velikosti 200 x 250 mm.



Obr. 5-24 Geometrie pro odladění CFD analýz



Obr. 5-25 Okrajová podmínka na hranici okolí

Konečnoprvková síť je tvořena čtvercovými prvky o velikosti 1,5 mm. Celkový počet prvků je 23026. Hranice modelovaného okolí je vhodné označit jako „outlet“, těmto hranicím je následně automaticky přiřazena správná okrajová podmínka.

Nastavení řešiče je zvoleno jako „Pressure-Based“, rychlost je definována absolutně. Analýza je nastavena jako tranzientní, sleduje tedy vývoj jednotlivých veličin v závislosti na čase. Při analýze není využito žádné osy symetrie. Gravitace není uvažována z důvodu zanedbatelného vlivu na tento typ proudění.

Z výpočetních modelů jsou do analýzy zahrnuty:

- Multifázový model
- Rovnice pro zachování energií
- Turbulentní model

Turbulentní model je použit k-ε. Model byl nastaven jako realizovatelný, korekce v blízkosti stěn byly zvoleny jako „scalable“. Hodnoty konstant pro výpočet jsou shodné jako u analýzy proudění strukturami a jsou uvedeny v tabulce 5-3 v kapitole 5.3.3. Proudícím plynem je vzduch, uvažována je i jeho stlačitelnost. Model stlačitelnosti je zvolen jako ideálně stlačitelný plyn. Stěny hlavně jsou nastaveny jako okrajová podmínka typu „wall“ a jsou uvažovány jako dokonale tuhé. Podél stěn je zamezeno pohybu plynů a rychlost proudění u stěn je tedy vždy nulová. Hranice vyobrazené na obr. 5-25 jsou nastaveny jako okrajová podmínka „pressure outlet“, nastaven je atmosférický tlak okolí 101325 Pa.

Metoda řešení byla zvolena jako „SIMPLE“, konstanty pro řízení výpočtu a limity pro jeho zastavení byly ponechány v základním nastavení.

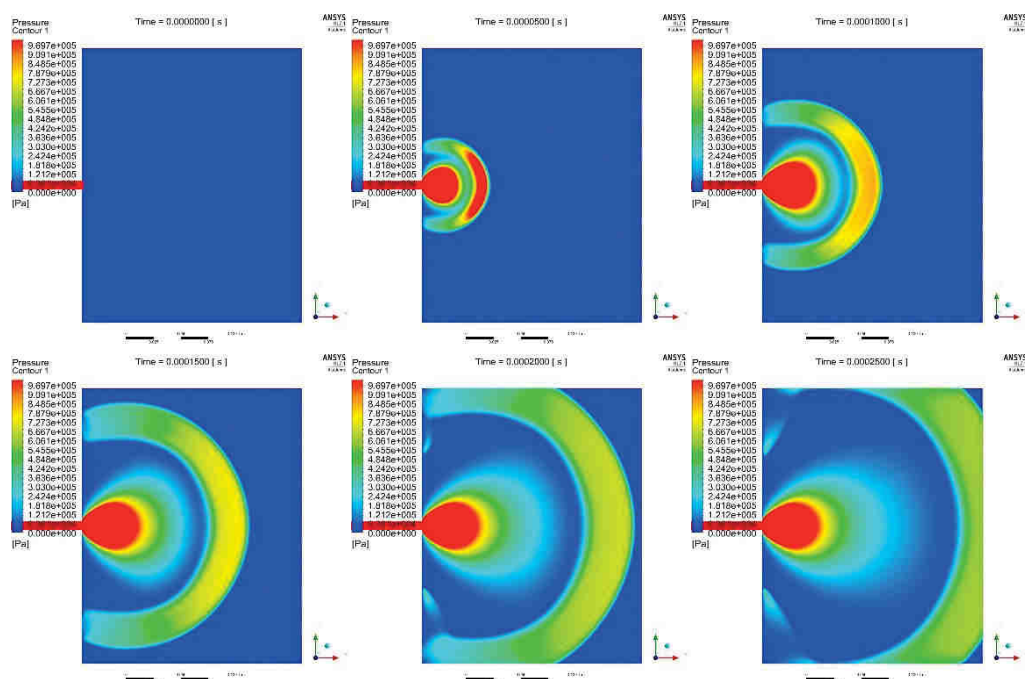
Pro inicializaci výpočtu je použita hybridní inicializace. Výchozí stav plynů v čase $t = 0$ s je nastaven pomocí nástroje „Patch“. Tlak uvnitř hlavně vychází z vnitřní balistiky a pro hlaveň délky 8" má hodnotu 60 MPa. Plyny mají také výchozí rychlost díky expanzi prostoru v hlavni. Tato rychlost je hned za střelou stejná jako rychlost střely, postupně se však snižuje směrem k závěru. Pro zjednodušení analýzy byla rychlost plynu nastavena konstantní v celém objemu hlavně a to 510 m/s.

Dále bylo nastaveno automatické ukládání jednotlivých veličin po každém výpočetním kroku, aby bylo možné vytvořit časovou závislost veličin.

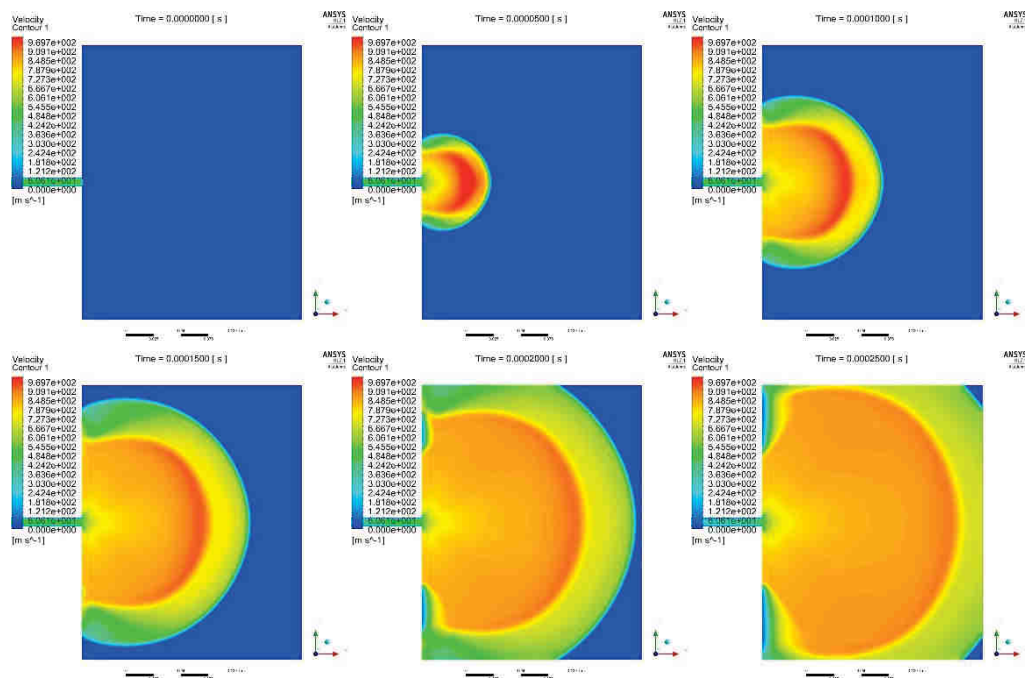
Časový krok byl zvolen $5e-7$ s. Vetší časové kroky způsobovaly u některých analýz divergenci výpočtu. Počet kroků na jednu analýzu je 500, konečný čas je tedy $t = 0,00025$ s. Maximální počet iterací je stanoven na 75, výpočet běžně zkonverguje během 40 iterací.

Pro ilustraci je vývoj tlaku v čase jeobrazen na obr. 5-26. Měřítko je nastaveno na maximální hodnotu 1 MPa, aby bylo možné sledovat tlakovou vlnu šířící se od ústí

hlavně. Číselné hodnoty neodpovídají reálným během výstřelu, sledován je především průběh šíření tlakové vlny.



Obr. 5-26 Vývoj tlaku v čase (0 s; 0,05 ms; 0,1 ms; 0,15m s; 0,2 ms; 0,25 ms)



Obr. 5-27 Vývoj rychlosti v čase (0 s; 0,05 ms; 0,1 ms; 0,15m s; 0,2 ms; 0,25 ms)

5.5.2 Analýza vlivu střely

Základní analýzy probíhaly zjednodušeně ve 2D prostoru, pro ověření funkce vortexu a výpočet zatížení však bylo potřeba řešit úlohu i ve 3D. Při prostorové analýze však z důvodu výpočetní náročnosti nebylo možné využití dynamické sítě pro simulaci pohybu střely. Z tohoto důvodu byl sledován vliv střely na samotné proudění.

Analýza vlivu střely probíhala ve dvou konfiguracích. Bez úst'ového zařízení a u dvoukomorové varianty úst'ového zařízení.

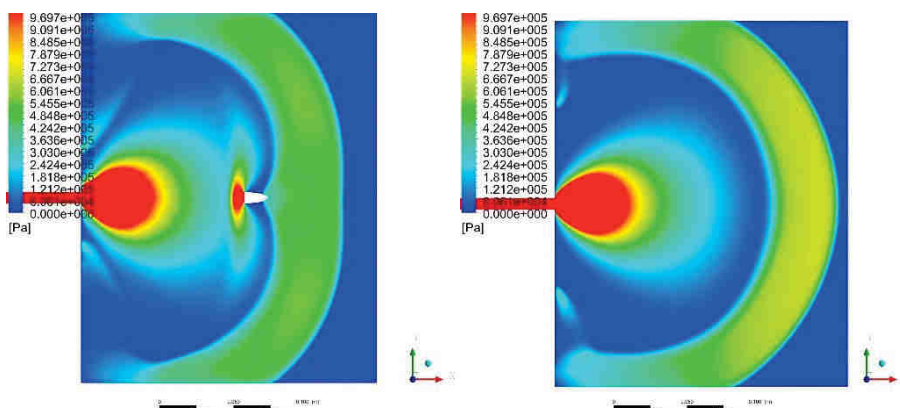
Nastavení výpočtu je shodné předchozí kapitolou, navíc je využito dynamické sítě pro pohyb střely v čase. Jedná se o pokročilý nástroj řízení sítě, pohyb tělesa je definován pomocí externího scriptu psaného v programovacím jazyce C+. Program ANSYS Fluent vyžaduje, aby byly jakékoliv skripty zkompileovány, k tomu byl využit program Microsoft Visual Basic 2012 implementovaný přímo do programu ANSYS. Použitý script je zobrazen na obrázku 72. Rychlost střely je pro zjednodušení výpočtu volena konstantní a to 550 m/s. Příkaz pro translační pohyb ovšem nedovolí aplikovat konstantní rychlost, proto je využit příkaz pro oscilační pohyb, který konstantní rychlost zvládá stabilně. Střela je definována jako dokonale tuhé těleso. Mezi jednotlivými kroky výpočtu je vždy konečnoprvková síť přepočítána pro novou geometrii. Minimální velikost prvku pro přepočítávané prvky je 1 mm a maximální 1,8 mm. Kritérium pro přepočítání prvků je deformace prvku („skewness“) 0,7.

Výsledky jednotlivých analýz jsou uvedeny v příloze 2.

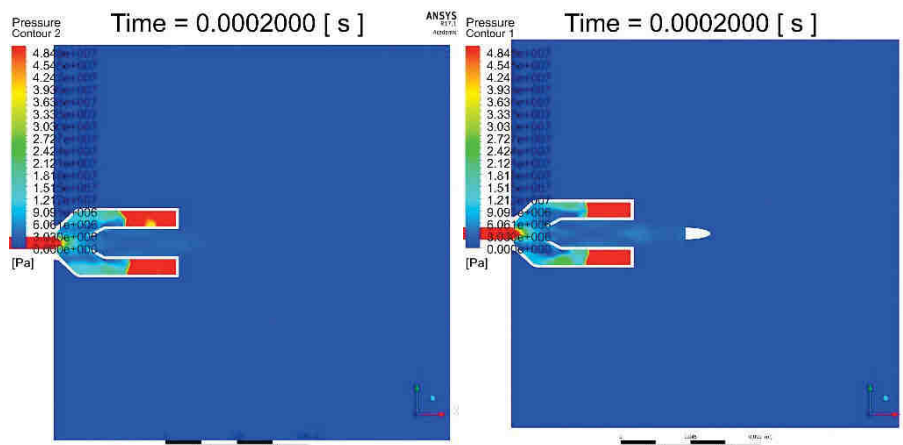
```
#include "udf.h"
#include "dynamesh_tools.h"
DEFINE_CG_MOTION(oscillate,dt,vel,omega,time,dttime)
{
  Thread *t;
  face_t f;

  t = DT_THREAD(dt);
  begin_f_loop(f,t)
  {
    vel[0] = 550 ;
  }
  end_f_loop(f,t)
}
```

Obr. 5-28 Script pro řízení dynamické sítě



Obr. 5-29 Vliv střely na tlak v čase $t = 0,2$ ms

Obr. 5-30 Vliv střely na tlak v čase $t = 0,2$ ms u ústového zařízení

Bylo zjištěno, že při tomto nastavení CFD analýzy má střela na proudění vliv pouze v jejím nejbližším okolí, na hodnoty tlaku a rychlosti v rámci zařízení je vliv minimální. Z toho důvodu je možné u analýz ve 3D prostoru střelu zanedbat.

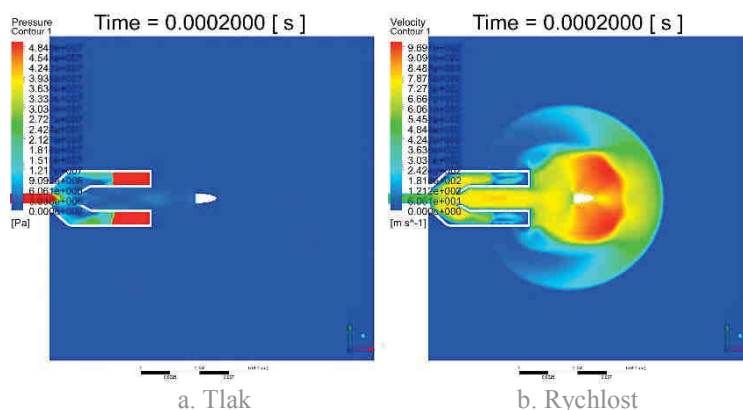
5.5.2 Analýza konstrukčních variant

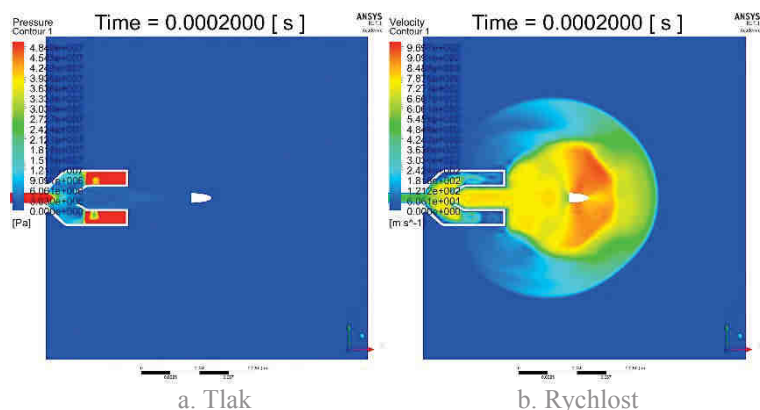
Vzhledem k výpočetní náročnosti těchto úloh, kdy jedna analýza může trvat i několik dní, není možné provést analýzy plynule se měnících parametrů zařízení. Bylo tedy vybráno několik konstrukčních úprav a byl sledován jejich dopad na proudění plynů.

Analýzované varianty:

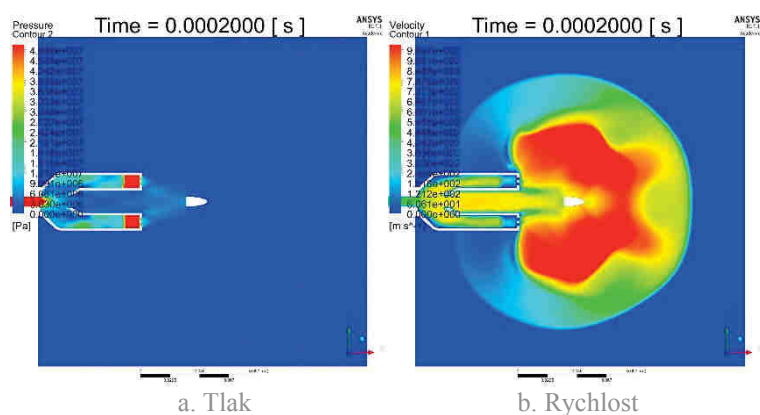
- Dvoukomorová varianta, bez střely
- Dvoukomorová varianta, se střelou
- Zkrácená dvoukomorová varianta, se střelou
- Otevřená dvoukomorová varianta, se střelou
- Otevřená zkrácená dvoukomorová varianta, se střelou

Výsledky jednotlivých analýz jsou uvedeny v příloze 2.

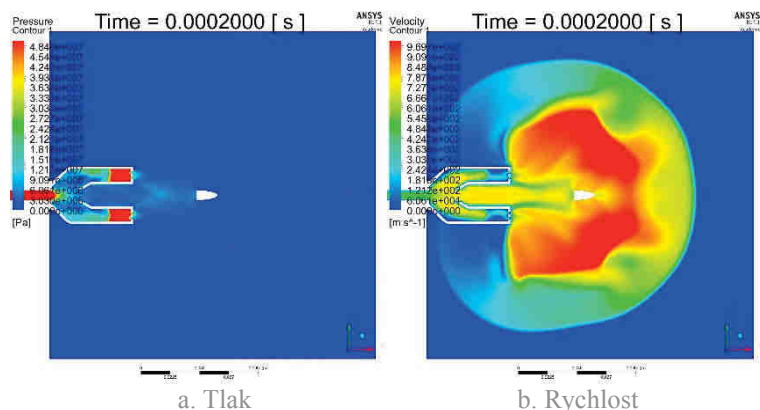
Obr. 5-31 Dvoukomorová varianta, se střelou, čas $t = 0,2$ ms



Obr. 5-32 Zkrácená dvoukomorová varianta, se střelou, čas $t = 0,2$ ms



Obr. 5-33 Otevřená dvoukomorová varianta, se střelou, čas $t = 0,2$ ms

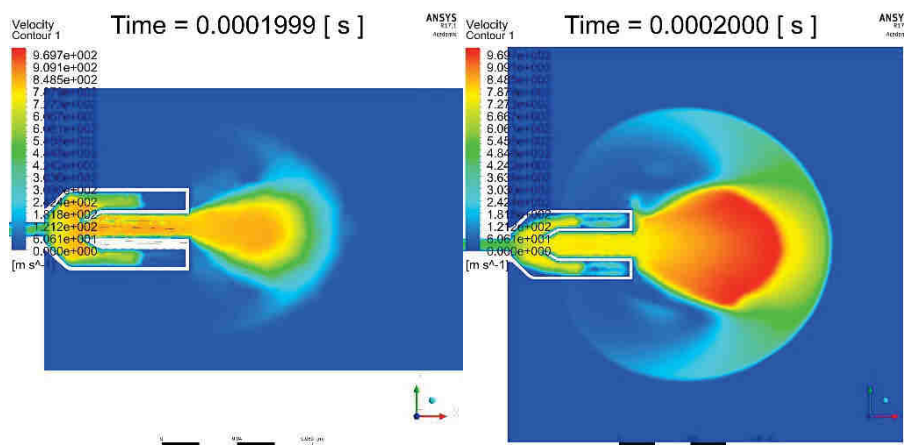


Obr. 5-34 Otevřená zkrácená dvoukomorová varianta, se střelou, čas $t = 0,2$ ms

Zkrácená dvoukomorová varianta byla uvažována pro snížení výrobních nákladů a zlepšení kompaktnosti. Z analýz vyplynulo, že v této variantě dochází k přílišnému nárůstu tlaku v komoře se strukturou. Z toho důvodu byla zvažována i varianta otevřená, kde konec není uzavřen, ale je ukončen strukturou. U této varianty však docházelo k značnému mísení povýstřelových zplodin s okolním vzduchem, čímž se značně zvyšuje riziko vzniku druhotného plamene. Bylo tedy ověřeno že původní konstrukční varianta vycházející z rešerše je pro danou aplikaci nejvhodnější z uvažovaných variant.

5.5.3 Ověření funkce vortexu

Pro ověření funkce vortexového konstrukčního prvku je zapotřebí analyzovat proudění ve 3D prostoru. Z důvodu výpočetní náročnosti není v analýzách uvažována střela. Nastavení analýzy je obdobné jako v kapitole 5.5.1, jen jsou okrajové podmínky a výchozí stav plynů aplikovány prostorově.

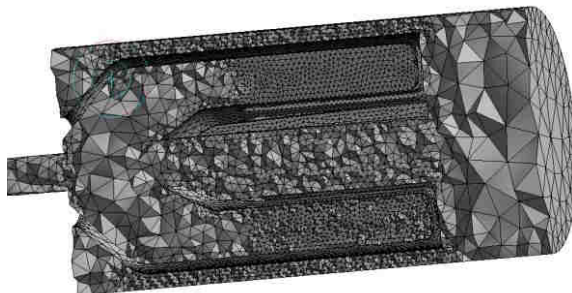


Obr. 5-35 Porovnání rychlosti proudění při použití vortexu (vlevo) a bez něj (vpravo)

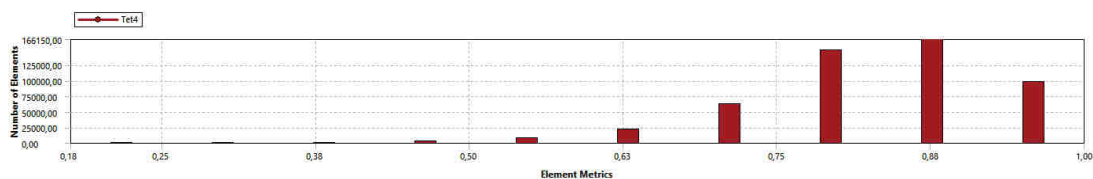
Na obr. 5-35 vlevo je zobrazena rychlost proudění plynů při použití vortexového konstrukčního prvku, vůči obrázku vpravo, kde tento prvek použit není, je vidět značné zúžení kužele. Díky tomu je omezeno mísení povýstřelových zplodin s okolním vzduchem, čímž je snižováno riziko vzniku druhotného plamene. Výsledky jednotlivých analýz jsou uvedeny v příloze 2.

5.5.4 Výpočet zatížení zařízení

Poslední CFD analýzou byl výpočet zatížení zařízení pro následnou statickou strukturální analýzu. Vůči předchozím analýzám proběhlo několik změn, zejména s cílem zpřesnit výpočet. V geometrii je diamondová struktura simulována přepážkami s totožným objemovým podílem 50 %. Součástí modelu je také vortex. Okolí zařízení bylo značně zredukováno, aby bylo možné co nejvíce zjemnit konečnoprvkovou síť uvnitř zařízení. Velikost prvků je řízena adaptivně se zjemněním v blízkosti stěn. Minimální velikost prvku je nastavena na 0,3 mm, maximální pak 7 mm. Celkový počet prvků je 508001, maximální počet prvků pro používanou licenci programu je 512000.



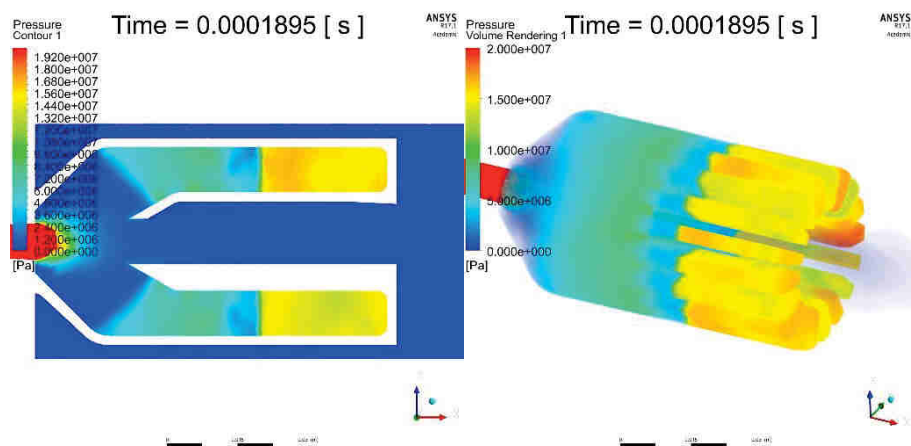
Obr. 5-36 Konečnoprvková síť pro výpočet zatížení



Obr. 5-37 Histogram kvality sítě

Při nastavení samotné analýzy byl snížen časový krok až na $1e-7$ s. Maximální počet iterací na časový krok byl zvýšen na 100. Díky tomu každý jednotlivý krok dokonverguje do předem nastavených limitů a není omezen počtem iterací. Tyto úpravy nicméně vedou k značnému zvýšení výpočetních nároků, tento samotný výpočet trval počítači s procesorem Intel Core i7 přibližně 100 hodin výpočetního času. Tato analýza vyžaduje alespoň 300 GB volného místa na disku.

Výsledkem je přibližný tlak působící uvnitř zařízení, který uvnitř struktury (přepážek) dosahuje 18 MPa. Aby byla eliminována případná chyba výpočtu je pro pevnostní analýzu použit tlak 20 MPa.



Obr. 5-38 Rozložení tlaku v zařízení

5.6 Pevnostní výpočet zařízení

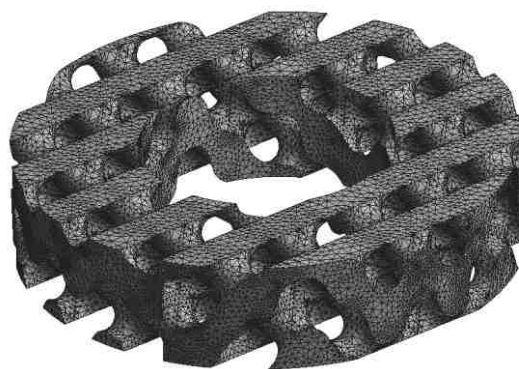
Pevnostní analýza byla provedena v programovém prostředí ANSYS Workbench 17.1.

5.6.1 Pevnostní výpočet struktury

Analyzovanou geometrií byl první řada buněk požitých v ústovém zařízení. Struktura je typu diamond, parametr t je roven nule a velikost základní buňky je 9 mm. Strukturou je tvořeno mezikruží o vnějším průměru 40 mm a vnitřním průměru 20 mm.

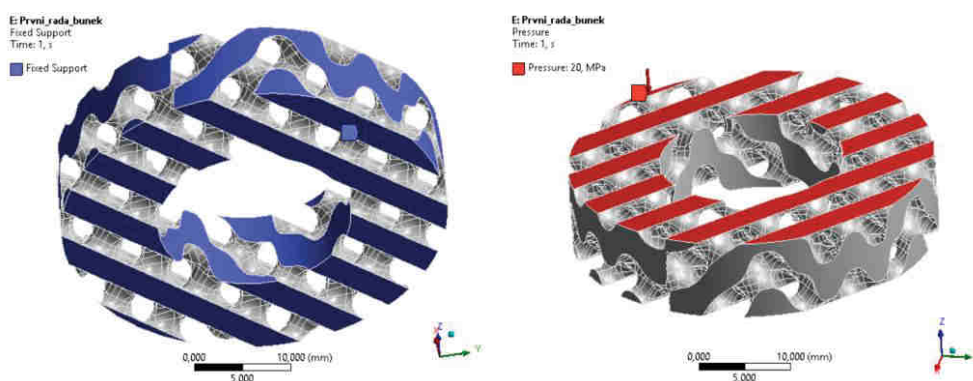


Obr. 5-39 První řada buněk



Obr. 5-40 Konečnoprvková síť

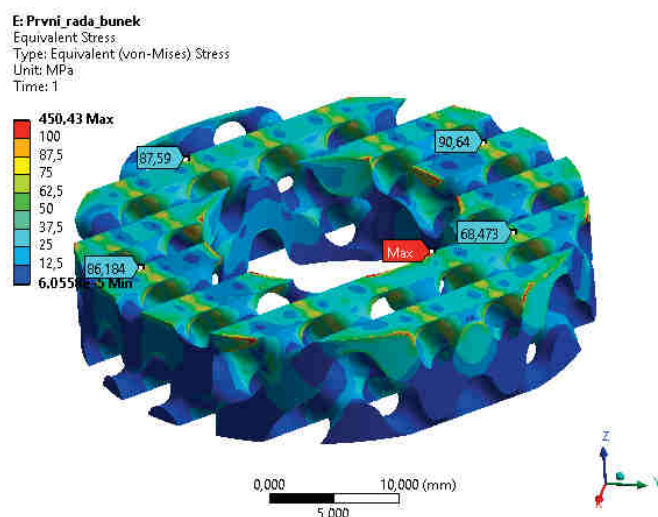
Materiálový model vychází z naměřených hodnot v práci Jakuba Kubrického. Využit je bilineární model s mezí kluzu 1030 MPa a mezí pevnosti 1318 MPa. Modul pružnosti je 118 GPa. Mez únavy pro neomezenou životnost je 430 MPa. [21] Konečnoprvková síť vyobrazená na obr. 5-40 je tvořena prvky o velikosti 0,5 mm, s celkovým počtem prvků 197231.



Obr. 5-41 Okrajové podmínky

Vnitřní a vnější plocha mezikruží je v samotném zařízení uchycena ve stěně, proto je na tyto plochy aplikována pevná okrajová podmínka, zamezující všechny posuvy i rotace. Tatáž podmínka je aplikována na spodní stranu struktury. Vrchní strana struktury je zatížena tlakem 20 MPa.

Na obr. 5-42 je zobrazeno napětí von-Mises. Maximální hodnot napětí bylo dosaženo v místech kde se struktura dotýká ústového zařízení. Tyto hodnoty byly zanedbány, jelikož výpočet neuvažuje možnost deformace samotného zařízení. Napětí v samotné struktuře dosahuje 90 MPa, což při uvažované mezi kluzu 1030 MPa znamená bezpečnost vůči mezi kluzu 11,5. MKP analýzou bylo ověřeno, že struktura dané zatížení vydrží s velkou rezervou.

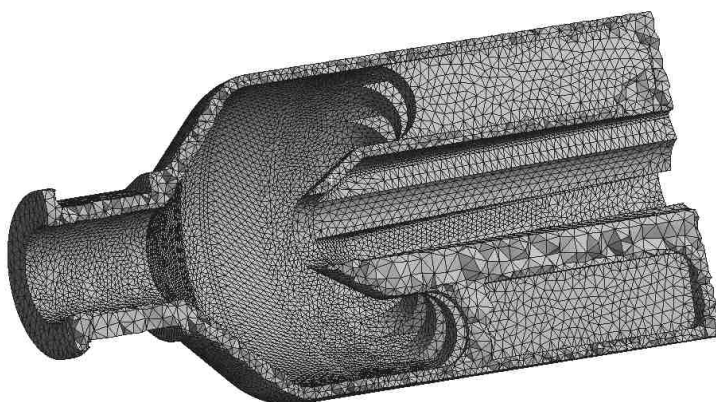


Obr. 5-42 Napětí von-Mises na začátku struktury

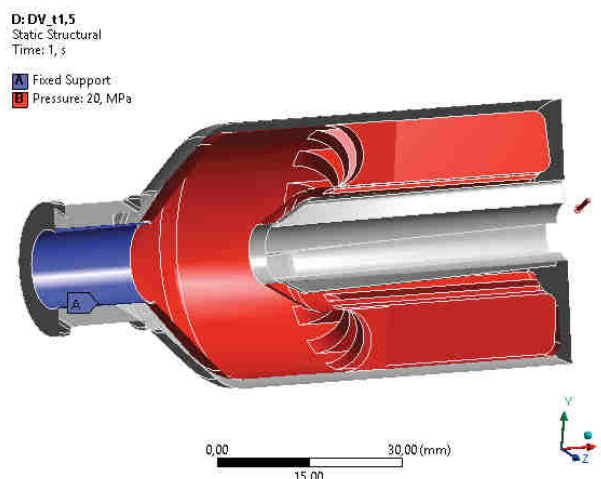
5.6.2 Pevnostní výpočet dvoukomorové varianty

Jelikož není možné analyzovat zařízení i s finální strukturou, byly zvoleny dva přístupy analýzy pro co nejpřesnější výsledky. U první varianty byla struktura nahrazena přepážkami se stejným objemovým podílem jako má struktura, obdobně jako v případě výpočtu zatížení zařízení. U druhé varianty je struktura nahrazena plným objemovým dílem, materiálové vlastnosti jsou pak převzaty z práce Jakuba Kubrického a vychází z tlakové zkoušky finální struktury.

U varianty s přepážkami je celé zařízení modelováno jako jedno těleso, velikost prvku je 0,7 mm, celkový počet prvků pak 288822. Materiálový model je shodný s analýzou první řady buněk z předchozí kapitoly.

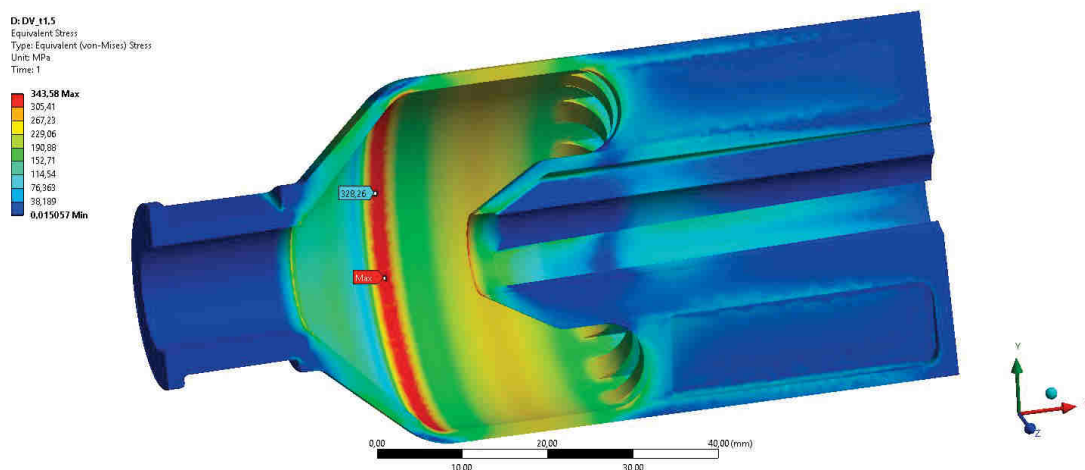


Obr. 5-43 Síť varianty s přepážkami



Obr. 5-44 Okrajové podmínky varianty s přepážkami

Zařízení je zatíženo tlakem 20 MPa na všechny vnitřní plochy, v místě uchycení zařízení k hlavni je aplikována pevná okrajová podmínka odebírající všechny stupně volnosti.

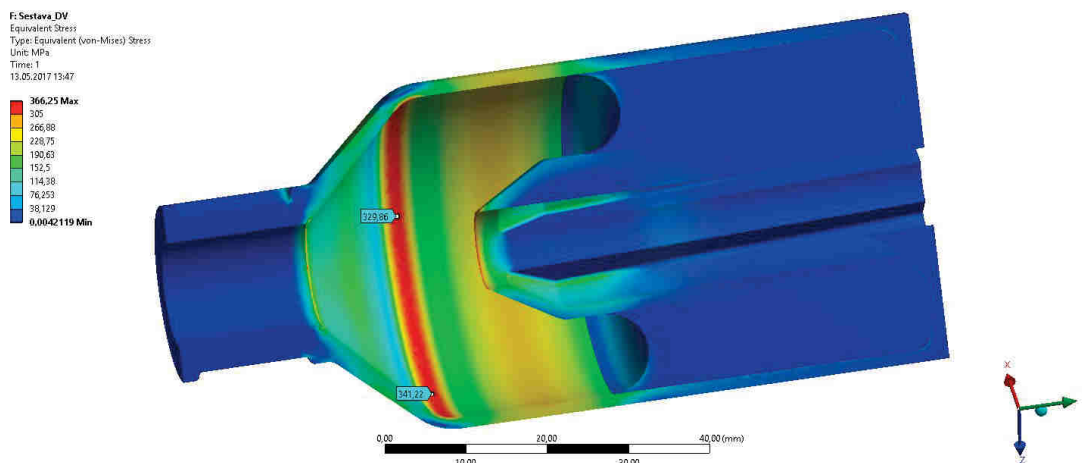


Obr. 5-45 Napětí von-Mises pro variantu s přepážkami

Z obr. 5-45 vyplývá, že kritickým místem zařízení je přechod mezi vnějším pláštěm a navazujícím kuzelem. Napětí von-Mises v tomto místě dosahuje 344 MPa.

U druhé varianty výpočtu je geometrie tvořena dvěma modely, kdy prvním je samotné úst'ové zařízení, druhým pak díl simulující strukturu. Modul pružnosti pro strukturu je 14 GPa, mez kluzu pak 229 MPa. [21]

Mezi jednotlivými tělesy ve vytvořen kontakt typu „bonded“, který zajišťuje dokonale tuhé spojení těles. Okrajové podmínky jsou obdobné jako u předchozí varianty. Uchycení zařízení je realizováno pomocí okrajové podmínky „fixed support“ a zatížení je tvořeno tlakem 20 MPa na vnitřní plochy zařízení.



Obr. 5-46 Napětí von-Mises pro druhou variantu

Z obr. 5-46 vyplývá, že oba zvolené přístupy jsou ekvivalentní, kritické místo je v obou případech totožné. Maximální napětí von-Mises v tomto místě je 342 MPa. V díle simulující strukturu je pak maximální napětí von-Mises 74 MPa. Jednotlivé koeficienty bezpečnosti jsou uvedeny v tab. 5-8.

Tab. 5-8 Koeficienty bezpečnosti

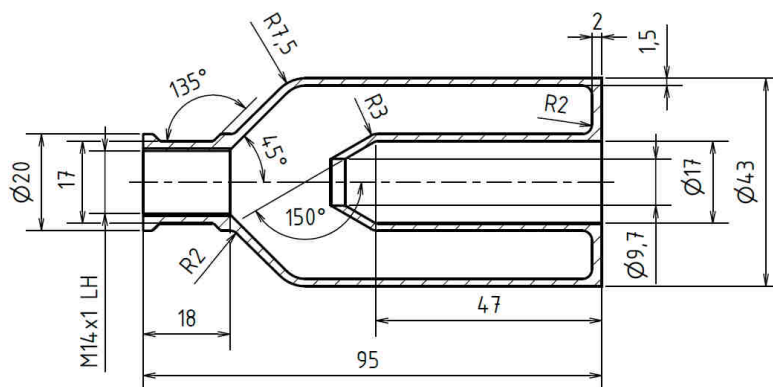
Bezpečnostní koeficient vůči meznímu stavu	Hodnota
Mezní stav únavy (neomezená životnost)	1,25
Mez kluzu	3
Mez kluzu (struktura)	11,5
Mez pevnosti	3,83

5.7 Výsledná konstrukce

Původní koncepce dvoukomorové varianty byla optimalizována hlavně s ohledem na technologii výroby. Nejvhodnější umístění zařízení na výrobní platformu je ústím směrem dolů, a to i s ohledem na typ namáhání zařízení a anizotropické vlastnosti materiálu vyrobeného pomocí 3D tisku. Případná trhlina v zařízení se při této konfiguraci musí šířit kolmo na jednotlivé vrstvy, tím se eliminují případné nedokonalosti při výrobě. Zařízení proto bylo upraveno, aby bylo v tomto směru úplně samonosné a nepotřebovalo žádné podpory během výroby. Aby bylo možné oddělit zařízení od platformy byl na čelo zařízení přidán přídavek na odřezání 0,5 mm.

5.7.1 Celkové rozměry

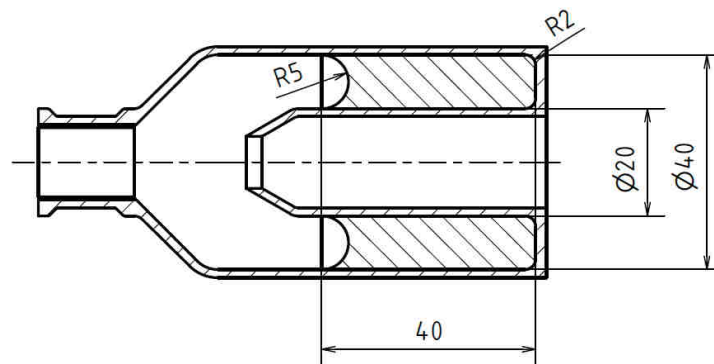
Základní rozměry ústového zařízení jsou zobrazeny na obr. 5-47. Část, která slouží k upevnění zařízení na hlaveň zbraně byla převzata ze stávajícího tlumiče plamene využívaného CZUB. Tloušťka stěn zařízení byla stanovena na základě pevnostní analýzy. Celková délka zařízení vychází z CFD analýz a rešerše.



Obr. 5-47 Základní rozměry ústového zařízení

5.7.2 Struktura

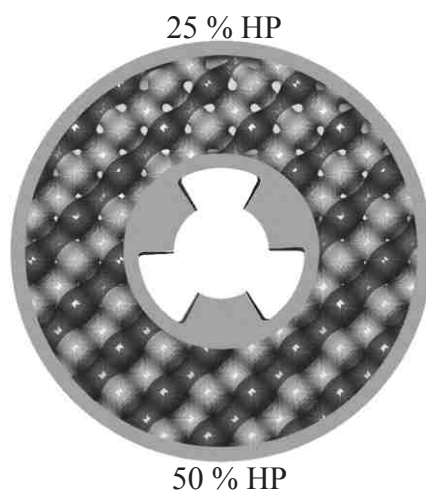
Struktura vyplňuje větší komoru v ústovém zařízení. Celkové rozměry struktury jsou zobrazeny na obr. 5-48. Začátek struktury je opatřen rádiusem, díky kterému mohou plyny do struktury vnikat plynuleji, zároveň je tím sníženo riziko, že by se některá část struktury mohla uvolnit rázovou vlnou.



Obr. 5-48 Základní rozměry výplňové struktury

V rámci diplomové práce bylo z důvodu výpočetní náročnosti analyzováno proudění pouze strukturou s konstantním parametrem t . Pro zlepšení kompenzace zdvihu by však bylo vhodné využít struktury gradientní. Ověření funkce gradientních struktur je tedy možné pouze experimentálně. Z toho důvodu byly vyrobeny ústové zařízení dvě, jedno se strukturou s parametry získanými pomocí CFD analýz, druhé s gradientní strukturou vycházející z první varianty. Kompenzace zdvihu u gradientních struktur funguje na principu, že do části struktury s menším hmotnostním podílem vnikne více plynů. Díky této nesymetričnosti vznikne moment, který působí proti momentu způsobujícímu zdvih zbraně při výstřelu.

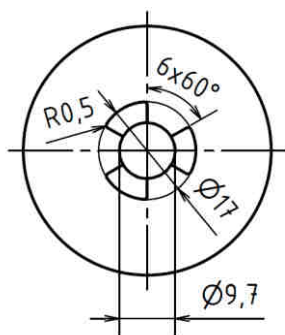
Gradientní struktura mění kvadraticky parametr t v ose y od 50 % hmotnostního podílu do 25 % hmotnostního podílu.



Obr. 5-49 Gradientní změna parametru t

5.7.3 Vortex

Vortex je tvořen třemi spirálovými prvky zobrazenými na obr. 5-50. Spirála je pravotočivá se stoupáním odpovídajícím jedné otáčky na 1080 mm. Rozměry vycházejí z řešerše a dispozic úst'ového zařízení.



Obr. 5-50 Čelo zařízení



Obr. 5-51 Vortex v úst'ovém zařízení



Obr. 5-52 Finální varianta univerzálního ústového zařízení

5.8. Tisk zařízení

Zařízení bylo vyrobeno pomocí technologie SLM v laboratoři aditivních technologií ústavu konstruování na FSI VUT Brno. Zařízení bylo vyrobeno ve dvou variantách, jedno s gradientní strukturou a druhé s konstantním parametrem t . Současně se zařízeními byl vyroben také vzorek pro tahovou zkoušku pro ověření pevnostních vlastností.

5.8.1 Parametry tisku

Parametry tisku byly zjištěny v rámci souběžně vypracovávané diplomové práce Bc. Jakuba Kubrického. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce 5-9 [21].

Tab. 5-9 Základní parametry tisku [21]

Parametr	Hodnota
Výška vrstvy	50 μm
Vzdálenost drah laseru	120 μm
Výkon laseru	125 W
Rychlost laseru	400 mm/s
Teplota platformy	200 °C
Inertní plyn	Argon

Celková délka stavby dosáhla 19 hodin, celkový počet vrstev byl 1900.

5.8.2 Postprocessing

Vyrobené univerzální ústové zařízení i se vzorkem pro tahovou zkoušku jsou zobrazeny na obr. 5-53. K oddělení vzorků od základové desky bylo použito elektroerozivní obrábění drátem. Tato metoda byla zvolena zejména kvůli malému

průřezu a její přesnosti. Zařízení včetně vzorku pro tahovou zkoušku byly následně tepelně zpracovány žíháním při 850 °C po dobu 3 hod. Povrch byl následně opískován korundem pro snížení jeho drsnosti a odstranění zoxidované vrstvy vzniklé během žíhání. Jelikož není možné vytisknout přímo hotové závity, posledním krokem byla výroba závitů pro uchycení na hlaveň.



Obr. 5-53 Vytisknuté úst'ové zařízení na platformě

5.9 Testování zařízení

Zařízení byla testována ve spolupráci s CZUB, ověřován byl především vliv zařízení na jednotlivé negativní jevy při výstřelu. Pro objektivní posouzení účinnosti byly také testovány varianty: zbraň bez úst'ového zařízení, standardně montovaný tlumič plamene. Při měření hluku byl testován také speciální tlumič hluku, jakožto speciální jednoúčelové zařízení.



Obr. 5-54 Úst'ové zařízení namontované na zbrani

5.9.1 Testování funkčnosti

Testování funkčnosti proběhlo na zavřené střelnici. Zbraň byla z důvodu bezpečnosti uchycena ve speciálním testovacím stojanu STZA 12M1 firmy Prototypa. K prvním výstřelům byla použita zbraň CZ 805 Bren v ráži 5,56x45 mm NATO. Tato zbraň má také delší hlaveň což způsobí menší tlak na ústí a tím i menší zatížení ústového zařízení. U obou univerzálních ústových zařízení byla prokázána funkčnost i bezpečnost. Následně došlo k výměně zbraně za CZ Bren 2 v ráži 7,62x39 mm, s délkou hlavně 9". I s touto zbraní bylo provedeno několik zkušebních výstřelů ze stojanu, čímž byla prokázána funkčnost i bezpečnost.



Obr. 5-55 Zbraň CZ Bren 2 ve zkušebním stojanu

5.9.2 Výskyt plamene

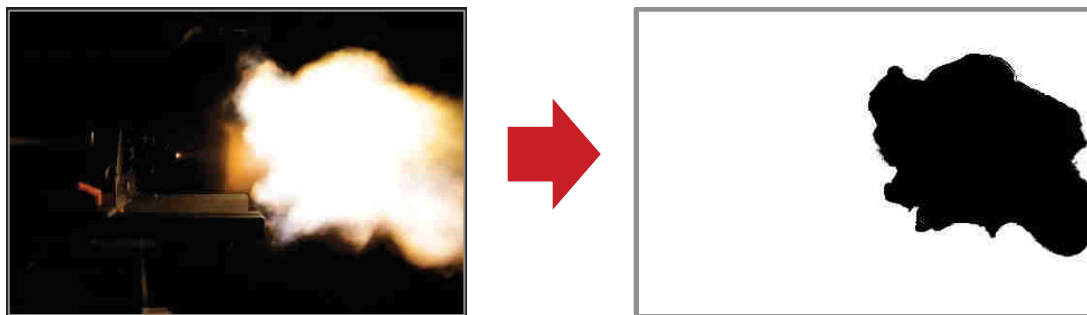
Výskyt plamene byl ověřován ve stejném zkušebním stojanu jako při testování funkčnosti. Zaznamenávacím zařízením byl fotoaparát Canon EOS 500D, který byl uchycen ve stativu ve výšce zbraně, čočka směřovala na ústí hlaveň. Vzdálenost mezi fotoaparátem a zbraní byla 80 cm. Aby nedošlo k ovlivnění během mačkání spouště, byla využita spoušť dálková. Pro zachycení plamene před ústím bylo využito dlouhých expozičních časů, jednotlivé parametry nastavení jsou zobrazeny v tab. 5-10.

Tab. 5-10 Nastavení fotoaparátu Canon EOS 500D

Nastavení fotoaparátu Canon EOS 500D	
Rozlišení	4752x3168
DPI	72 dpi
Bitová hloubka	24
Závěrka clony	f/3.5
Délka expozice	2 s
Citlivost na světlo	ISO 200
Ohnisková vzdálenost	18 mm
Režim blesku	Manuálně vypnuto
Režim ostření	Manuální
Stabilizace obrazu	Zapnuta
Vyvážení bílé	Automatické

Pro srovnání byl plamen u jednotlivých ústových zařízení zachycen vždy třikrát, následně byl zachycen také výstřel bez použití jakéhokoliv ústového zařízení.

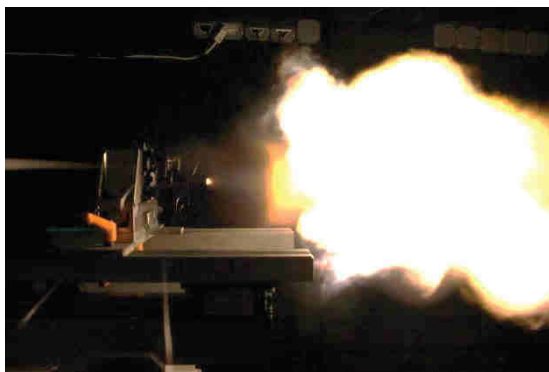
Jednotlivé fotografie byly vyhodnoceny v programu GIMP 2.8.20. Postup vyhodnocení je zobrazen na obr. 5-56. Nejdříve byl automaticky detekován plamen na základě barevného rozložení, tato oblast byla následně zvýrazněna černou barvou a zbytek fotografie byl vymazán. Z takto upravené fotografie byla na základě histogramu vyhodnocena plocha, kterou zabírá plamen.



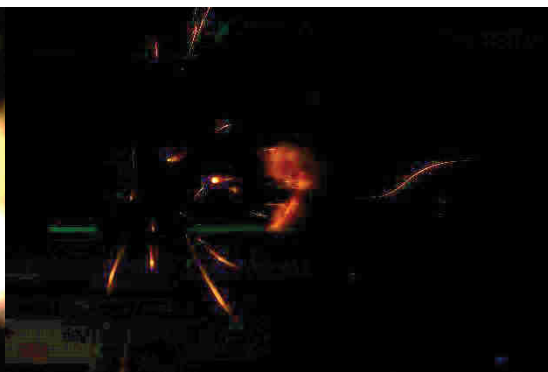
Obr. 5-56 Postup vyhodnocení plamene

Na obr. 5-57 je zobrazen tzv. „druhotný plamen“ při výstřelu ze zbraně CZ Bren 2 ráže 7,62x39 mm bez použití úst'ového zařízení. Tento stav je brán jako referenční pro porovnávání účinnosti jednotlivých úst'ových zařízení. Na obr. 5-58 je vyobrazen výstřel při použití jednoúčelového tlumiče plamene, který je na tuto zbraň standardně montován. Z obrázku je patrné, že došlo k úplné eliminaci druhotného plamene, před hlavní zůstává jen drobný náznak hoření. Redukce plamene vůči stavu bez úst'ového zařízení dosahuje až 97 %.

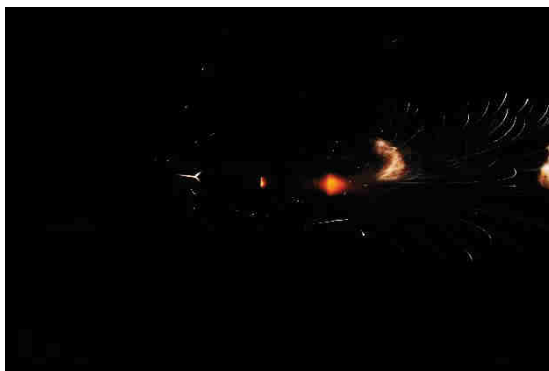
Při použití univerzálního úst'ového zařízení došlo k výskytu druhotného plamene v pěti ze šesti případů, při ráži 7,62x39 mm. V jednom případě při použití gradientního zařízení vyobrazeném na obr. 5-59 došlo k eliminaci druhotného plamene, redukce v tomto případě byla 99 %. V ostatních případech byla redukce plamene u gradientního zařízení 57 %, u negradientního zařízení 46 %. Jednotlivé fotografie a jejich vyhodnocené verze jsou zobrazeny v příloze. Byl také vyhodnocován plamen u univerzálních úst'ových zařízení při použití ráže 5,56x45 mm NATO, v tomto případě došlo k eliminaci druhotného plamene ve všech případech. Důvodem proč se plamen vyskytoval u ráže 7,62x39 mm ale nikoliv u ráže 5,56x45 mm NATO je, že při ráži 7,62x39 mm se vyskytuje více nespálených prachových částic při opuštění hlavně střelou. Z testování tedy vyplynulo, že funkce tlumení plamene u univerzálních úst'ových zařízení je na hranici výskytu druhotného plamene, pro jeho jistou eliminaci by bylo zapotřebí lehkých úprav geometrie zařízení. Pokud by byla použita zbraň v ráži 7,62x39 mm s delší hlavní, než byla testována, s velkou pravděpodobností by došlo k úplné eliminaci druhotného plamene.



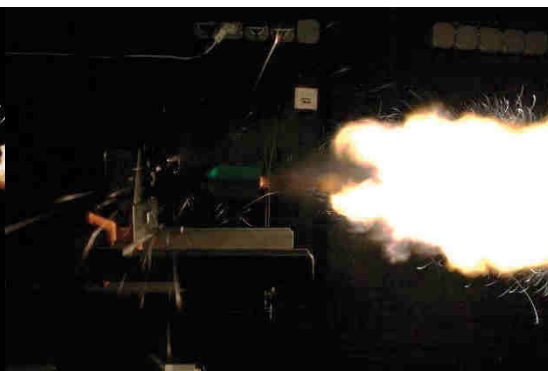
Obr. 5-57 Plamen bez úst'ového zařízení



Obr. 5-58 Tlumič plamene CZUB



Obr. 5-59 Univerzální úst'ové zařízení výstřel č.1



Obr. 5-60 Univerzální úst'ové zařízení výstřel č.2

Tab. 5-11 Redukce plamene

Redukce plamene	
Bez zařízení	-
Gradientní univerzální úst'ové zařízení	-57 %
Negradientní univerzální úst'ové zařízení	-46 %
Tlumič plamene	-97 %
Gradientní univerzální úst'ové zařízení (výstřel č.1)	-99 %
Gradientní univerzální úst'ové zařízení (ráže 5,56x45 NATO)	-99 %

Při testování bylo zjištěno, že dochází k uvolňování částic titanu z univerzálních úst'ových zařízení. Tyto částice pak samovolně na vzduchu hořely, což se projevovalo výskytem jisker při výstřelu. Tomuto uvolňování by mohlo účinně zabránit správné povlakování zařízení.

5.9.3 Měření zpětného rázu a kompenzace zdvihu

Měření zpětného rázu a kompenzace zdvihu probíhalo s pomocí vysokorychlostní kamery OLYMPUS i-SPEED 3. Kamera byla umístěna ve výšce hlavně. Zbraň byla snímána z boku, ze vzdálenosti 1 m. Na zbrani byly vyznačeny dva body ve vzdálenosti 100 mm, jejichž pohyb byl pomocí vysokorychlostní kamery snímán a následně vyhodnocován. Rozlišení obrazu bylo 816x608 a rychlost snímání byla nastavena na 5000 snímků za sekundu.

Testovány byly následující varianty:

- Zbraň bez úst'ového zařízení
- Tlumič plamene
- Univerzální úst'ové zařízení – negradientní
- Univerzální úst'ové zařízení – negradientní – namontováno obráceně
- Univerzální úst'ové zařízení – gradientní
- Univerzální úst'ové zařízení – gradientní – namontováno obráceně

U každé testované varianty bylo provedeno 5 výstřelů. Univerzální úst'ová zařízení byla testována také ve stavu, kdy byly namontovány obráceně. Tím bylo zjišťováno, jaký vliv má nesprávná montáž na samotnou střelbu.

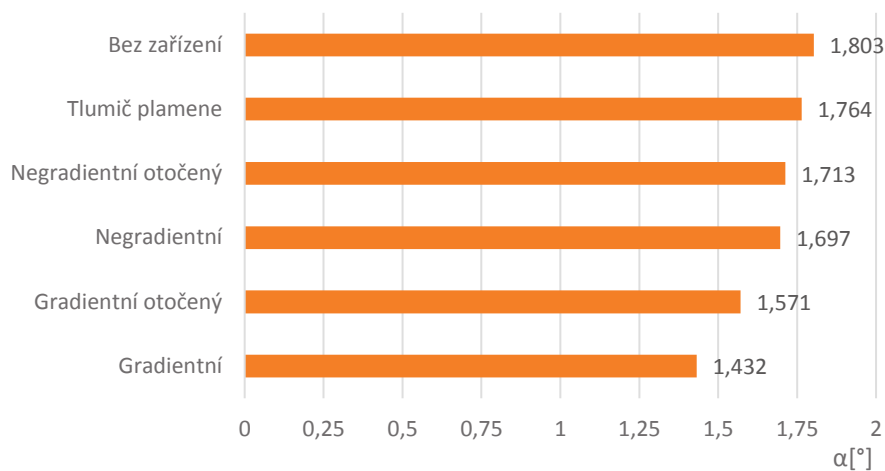


Obr. 5-61 Záběr z vysokorychlostní kamery na referenční body

Kompensace zdvihu byla vyhodnocena pomocí maximálního úhlu vychýlení referenčních bodů vůči počátečnímu stavu. Výsledné výchylky jsou zobrazeny v grafu 5-15.

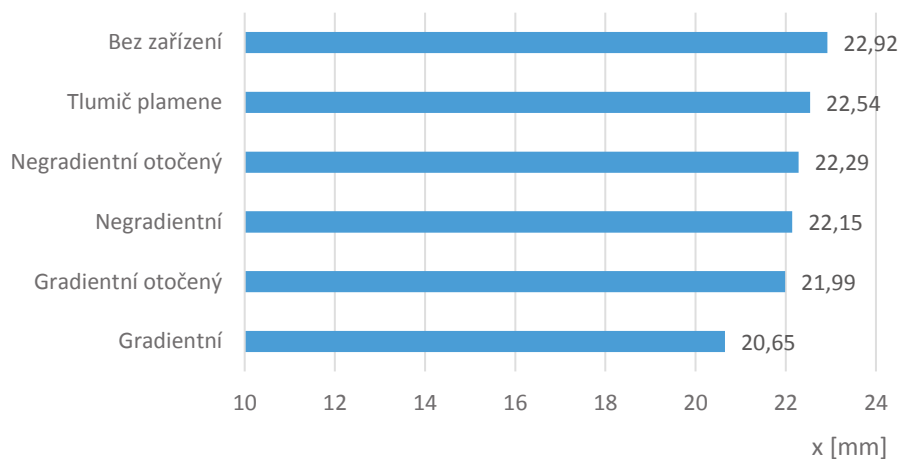
Kompensace zpětného rázu byla vyhodnocena na základě pohybu jednotlivých referenčních bodů v záporné ose x vůči výchozí pozici. Porovnání výchylky pro jednotlivé zařízení je zobrazeno v grafu 5-16.

Max úhel vychýlení zbraně



Graf 5-15 Úhlové výchylky zbraně pro jednotlivá zařízení

Maximální pohyb zbraně v ose x



Graf 5-16 Posun zbraně pro jednotlivá zařízení

Tab. 5-12 Kompenzace zdvihu

Kompenzace zdvihu	
Bez zařízení	-
Tlumič plamene	-2,12 %
Negradientní otočený	-4,99 %
Negradientní	-5,87 %
Gradientní otočený	-12,85 %
Gradientní	-20,58 %

Tab. 5-13 Redukce zpětného rázu

Redukce zpětného rázu	
Bez zařízení	-
Tlumič plamene	-1,67 %
Negradientní otočený	-2,78 %
Negradientní	-3,4 %
Gradientní otočený	-4,09 %
Gradientní	-9,91 %

Z měření vyplynulo, že nejlepší kompenzace zdvihu bylo dosaženo při použití gradientního univerzálního úst'ového zařízení, které bylo namontováno v souladu s jeho konstrukcí (loga na zařízení nejsou otočena a jsou dobře čitelná). Úhel vychýlení zbraně při výstřelu se snížil o 20 %. Při použití úst'ového zařízení s negradientní strukturou bylo snížení maximálního úhlu vychýlení 5 %.

Univerzální úst'ové zařízení s gradientní strukturou vykázalo také nejlepší tlumení zpětného rázu, a to o přibližně 10 %.

5.9.4 Měření hluku

Měření hluku probíhalo na venkovní střelnici, aby bylo dosaženo co nejméně ovlivněných výsledků. Pro měření byl použit hlukoměr Brüel & Kjær 2270.

Hluk byl měřen ve dvou pozicích hlukoměru. První pozice byla za střelcem ve výšce 170 cm, což odpovídá výšce hlavy střelce. Vzdálenost byla experimentálně stanovena na 6 m, při menších vzdálenostech docházelo k přebuzení hlukoměru, což by mělo za následek ovlivnění měření. Druhá pozice byla z bezpečnostních důvodů v úrovni střelce, kolmo na osu hlavně ve výšce 170 cm. Vzdálenost od střelce byla 10 m, aby nedocházelo k přebuzení měřícího zařízení. Měřící sestava je zobrazena na obr. 5-62.



Obr. 5-62 Měřící sestava

Pro každou pozici byl měřen hluk pro tyto varianty:

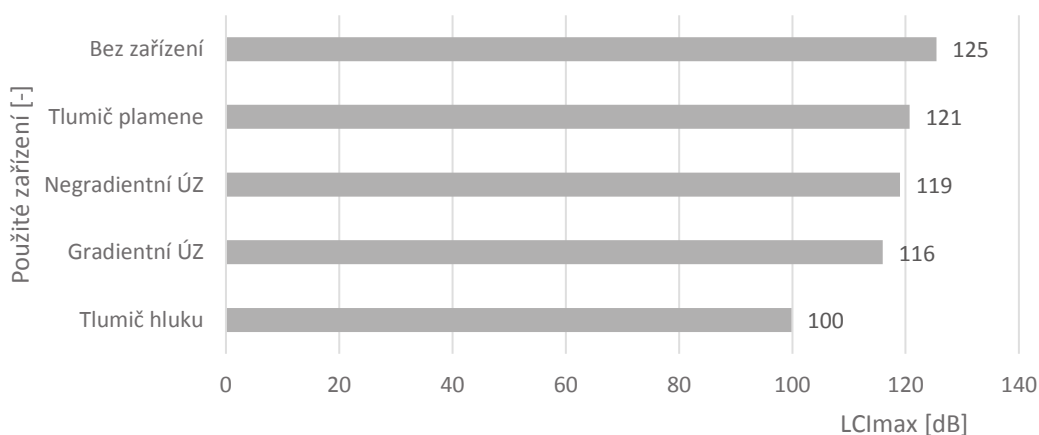
- Zbraň bez ústového zařízení
- Tlumič plamene
- Univerzální ústové zařízení – negradientní
- Univerzální ústové zařízení – gradientní
- Tlumič hluku

Jednouúčelový tlumič hluku byl do měření přiřazen, aby bylo možné porovnat účinnost univerzálních ústových zařízení také vůči speciálnímu zařízení. Pro každou variantu a pozici byly provedeny 3 výstřely. Výsledné hodnoty jsou tvořeny aritmetickým průměrem. Aplikován byl váhový filtr C. Časová konstanta pro průměrování je zvolena nejmenší možná, tzv. “impulzní“. Jako referenční hodnoty pro porovnání jednotlivých zařízení slouží maximální naměřená hladina akustického tlaku. Z grafů 5-17 a 5-18 vyplývá, že největší hladiny akustického tlaku bylo dosaženo bez použití ústového zařízení. Při použití tlumiče plamene došlo ke snížení hladiny pouze při umístění za střelcem o přibližně 5 dB, nikoliv však v úrovni střelce. Lepšího tlumení hluku dosáhly univerzální ústové zařízení, kde při umístění v úrovni střelce došlo shodně ke snížení hladiny akustického tlaku o 6 dB. Při umístění hlukoměru za střelcem pak o 6 dB u negradientního zařízení a o 9 dB u gradientního zařízení. Tento rozdíl může být způsoben tím, že gradientní zařízení má ve své části snížení objemový podíl struktury, tudíž i více prostoru pro expanzi plynů.

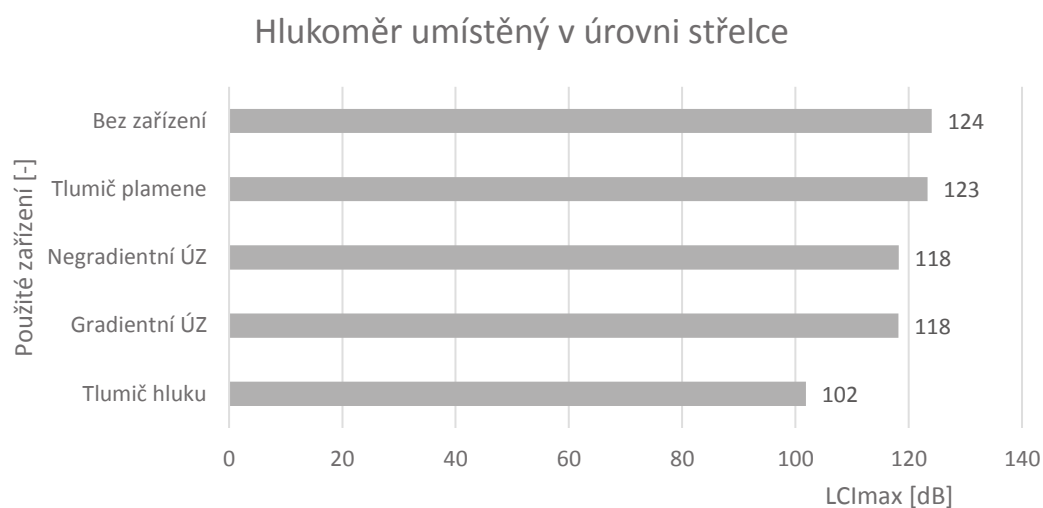
Nejlepších výsledků bylo dosaženo u speciálního tlumiče hluku. Pokles hladiny akustického tlaku pak dosahoval 25 dB při umístění za střelcem a 22 dB při umístění v úrovni střelce.

Jednotlivé hodnoty a grafy měření hluku jsou uvedeny v příloze. Navíc byla pro každé zařízení provedena oktávová analýza, výsledné grafy jsou také zobrazeny v příloze.

Hlukoměr umístěný za střelcem



Graf 5-17 Měření hluku – umístění za střelcem

**Graf 5-18** Měření hluku – umístění v úrovni střelce**Tab. 5-14** Tlumení hluku

Umístění	Typ zařízení	ΔLCImax
Za střelcem	Bez zařízení	0
Za střelcem	Tlumič plamene	-4 dB
Za střelcem	Negradientní ÚZ	-6 dB
Za střelcem	Gradientní ÚZ	-9 dB
Za střelcem	Tlumič hluku	-25 dB
V úrovni střelce	Bez zařízení	0
V úrovni střelce	Tlumič plamene	-1 dB
V úrovni střelce	Negradientní ÚZ	-6 dB
V úrovni střelce	Gradientní ÚZ	-6 dB
V úrovni střelce	Tlumič hluku	-22 dB

6 DISKUZE

Na základě rešerše bylo navrženo celkem 6 konstrukčních variant univerzálního úst'ového zařízení s přibližně 12 různými modifikací pro jejich optimalizaci. Všechny varianty byly navrženy s ohledem na výrobu technologií SLM a měly za cíl využít přednosti této technologie pro nekonvenční úst'ové zařízení. Z navržených koncepcí byla pro další zpracování vybrána dvoukomorová varianta univerzálního úst'ového zařízení, a to především z důvodu, že tato varianta měla největší potenciál pozitivně ovlivnit všechny nežádoucí jevy při výstřelu. Vetší komora měla být vyplněna strukturou, menší byla následně upravena pro optimální tlumení plamene.

V programu Autodesk Inventor byl vytvořen parametrický model prutové struktury, aby bylo možné rychle generovat její různé modifikace. Pro generování struktur definovaných matematickými funkcemi byl navržen zcela nový postup, který umožňuje vyjma polygonálních modelů vytvořit i objemové modely struktury. Objemový model je důležitý pro jakékoliv MKP analýzy. Tento postup dokáže také efektivně snížit počet ploch ve struktuře až 100x a to při zachování kvality modelu.

Pro získání okrajových podmínek pro CFD analýzy proudění plynů úst'ovým zařízením, byla provedena analýza vnitřní balistiky. Vnitřní balistika byla počítána dle normy NATO – STANAG 4367, pomocí programu IntBal1.0.

Optimální struktura pro použití v úst'ovém zařízení byla stanovena pomocí CFD analýz. Nejvýhodnějším typem z hlediska proudění je pro danou aplikaci struktura typu diamond. U této struktury byl následně optimalizován parametr t určující její hmotnostní podíl a také velikost základní buňky. Výsledná struktura měla velikost buňky 9 mm a parametr t roven nule. Pro lepší kompenzaci zdvihu zbraně při výstřelu byla navržena také gradientní struktura. Z důvodu velké výpočetní náročnosti nebylo možné simulovat proudění touto strukturou. Proto byla tato varianta ověřena experimentálně při testování.

Analyzováno bylo také proudění plynů v několika konstrukčních variantách samotného úst'ového zařízení. Zkoumán byl také vliv střely na proudění v dané analýze, střela přímo ovlivňuje všechny veličiny proudění pouze v jejím blízkém okolí. Proudění v komoře vyplněné strukturou prakticky neovlivňuje. Analyzován byl také vliv vortexu na proudění, bylo prokázáno, že díky němu je značně omezeno mísení povýstřelových zplodin s okolním vzduchem, čímž se snižuje riziko výskytu tzv. „druhotného plamene“. Z CFD analýz bylo také určeno přepokládané zatížení zařízení během výstřelu, a to vnitřní přetlak 20 MPa.

Pevnost navrženého zařízení byla výpočetně ověřena pomocí statické strukturální MKP analýzy. Ověřena byla také pevnost navržené struktury a celé zařízení bylo optimalizováno pro neomezenou životnost z hlediska únavy.

Navržené univerzální úst'ové zařízení bylo vyrobeno ve dvou variantách. První zařízení bylo vyrobeno se strukturou s konstantním parametrem t , druhé zařízení pak obsahovalo strukturu gradientní.

Funkčnost zařízení a jeho vliv na jednotlivé negativní jevy byla ověřena experimentálně. Z každého zařízení bylo během testování vypáleno přibližně 30 výstřelů, přičemž se neobjevily žádné známky případného poškození. V rámci měření bylo zjištěno, že obě vyrobené zařízení účinně tlumí plamen u menších ráží, než na jakou byly konstruovány. Při střelbě ze zbraně ráže 7,62x39 mm u některých výstřelů docházelo k výskytu tzv. „druhotného plamene“. Z měření vyplynulo, že v oblasti tlumení plamene by bylo vhodné udělat konstrukční úpravu zařízení, například snížit stoupání šroubovice vortexu. Navržené úst'ové zařízení s gradientní strukturou dokázalo snížit úhel vychýlení zbraně při výstřelu o 20 %. Zařízení s negradientní strukturou pak o 5 %. Tímto byla potvrzena schopnost gradientní struktury kompenzovat zdvih zbraně, rovněž bylo zjištěno, že pokud je zařízení namontováno obráceně, schopnost kompenzovat zdvih se sníží. Toto zařízení dokázalo také utlumit pohyb zbraně při výstřelu směrem dozadu o přibližně 10 %. Hladina akustického tlaku při výstřelu byla díky univerzálnímu úst'ovému zařízení snížena o 6-9 dB v závislosti na umístění hlukoměru. Lepšího tlumení dosáhl už jen speciální tlumič hluku násobné velikosti.

7 ZÁVĚR

7

Navržené univerzální úst'ové zařízení je schopné tlumit plamen, kompenzovat zdvih, redukovat zpětný ráz a také tlumit hluk při výstřelu, čímž byl splněn hlavní cíl diplomové práce. Zařízení také plně využívá možností aditivních technologií.

V rámci diplomové práce bylo navrženo několik koncepčních variant. Pomocí MKP analýz byla následně ověřována funkčnost vybrané varianty a také její optimalizace. Výsledné úst'ové zařízení bylo vyrobeno pomocí technologie SLM ve dvou variantách. Obě varianty byly následně testovány a porovnávány se stávajícím úst'ovým zařízením. Z navržených variant je účinnější varianta s gradientní strukturou. Přestože z hlediska tlumení plamene a hluku vykazuje obdobné výsledky jako varianta s negradientní strukturou, při kompenzaci zdvihu zbraně a redukci zpětného rázu byla prokazatelně lepší.

Realizaci této diplomové práce výrazně pomohl Bc. Jakub Kubrický, který optimalizoval SLM proces pro výrobu těchto zařízení. [21]

Univerzální úst'ové zařízení má potenciál nahradit v současné době používané jednoúčelové úst'ové zařízení. Přestože jednoúčelová zařízení dokážou konkrétní negativní jevy, na které byly navrženy, tlumit lépe, existuje mnoho situací, kdy je vhodnější využít zařízení univerzální.

Při následující optimalizaci úst'ových zařízení pro případnou výrobu by bylo vhodné zaměřit se zejména na lepší tlumení plamene, aby bylo spolehlivější. Toho by mohlo být docíleno změnou stoupání šroubovice vortexu, případně větším rozevřením jeho konce. S ohledem na výsledky jednotlivých měření by bylo vhodné analyzovat použití silnější gradientní změny parametru t ve struktuře.

Hlavní cíl i všechny dílčí cíle diplomové práce byly splněny.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SANTOS, Edson Costa, Masanari SHIOMI, Kozo OSAKADA a Tahar LAOUI. *Rapid manufacturing of metal components by laser forming. International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, vol. 46, 12-13, s. 1459-1468. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.005.
- [2] SLM – Selective Laser Melting. *3D Laboratory* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/rapid-prototyping/>
- [3] KUCHYŇKA, A.. *Tichá smrt: Tlumiče zvuku ručních palných zbraní*. 1. Publish weaponry specialization, 1999.
- [4] Úst'ová brzda D-Force MIC-H2 556 1/2-28. *TOKAREV.CZ* [online]. 2013 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.unrra.cz/shop/?104,ustova-brzda-s-kompenzatorem-d-force-mic-h2-556>
- [5] JP signature kompenzátor velký - černý. *Best Patron.eu* [online]. 2016 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://eshop.bestpatron.eu/cz-detail-880336-jp-signature-kompenzator-velky-cerny-zavit-1-2x28-875-tloustka-hlavne.html>
- [6] REHMAN, Hafizur, Seung Hwa HWANG, Berkah FAJAR, Hanshik CHUNG a Hyomin JEONG. *Analysis and attenuation of impulsive sound pressure in large caliber weapon during muzzle blast. Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2011, 25(10), 2601-2606 [cit. 2016-04-28]. DOI: 10.1007/s12206-011-0731-2. ISSN 1738494x.
- [7] PLÍHAL, Bohumil. *Přechodová balistika hlavnových zbraní*. Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2007. ISBN 9788072312429.
- [8] Piezoelektrické snímače. *E-automatizace* [online]. 2013 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/sila/sila_piezoelektricke_snimace.htm#top
- [9] Keith Hudson, M., Luchini, C., Keith Clutter, J. and Shyy, W. (2001), *The Evaluation of Computational Fluid Dynamics Methods for Design of Muzzle Blast Suppressors for Firearms. Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 26: 201–208. doi:10.1002/1521-4087(200110)26:4<201::AID-PREP201>3.0.CO;2-7
- [10] Condenser Microphone Cartridges — Types 4133 to 4181. *Bruel and Kjaer* [online]. 2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/Bp0100.pdf>
- [11] *Armádní noviny* [online]. 2014 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.armadninoviny.cz/domains/0023-armadninoviny_cz/useruploads/files/c1.jpg

- [12] DI MAIO, Vincent J. M. *Gunshot wounds: practical aspects of firearms, ballistics, and forensic techniques. 2nd ed.* Boca Raton: CRC Press, c1999. ISBN 0849381630.
- [13] AR15.com. *AR15.com* [online]. 2014 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <https://www.ar15.com/archive/topic.html?b=5&f=4&t=115986>
- [14] SWEENEY, Patrick. *Gunsmithing the AR-15 how to maintain, repair, accessorize.* Iola, WI: Gun Digest Books, 2010. ISBN 9781440214578.
- [15] AR-15 Flash Suppressor 3 Prong DPMS 1/2"x28 Thread Reduces Visible Flash. *Cheaperthandirt.com* [online]. 2015 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <https://www.cheaperthandirt.com/product/ar-15-flash-suppressor-3-prong-dpms-1-2x28-thread-reduces-visible-flash-884451005032.do>
- [16] DPMS Flash Hider A2 1/2"-28 Thread AR-15 Matte. *Midwayusa.com* [online]. 2015 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.midwayusa.com/product/343064/dpms-flash-hider-a2-1-2-28-thread-ar-15-matte>
- [17] SOMMERS, Sonja. *Muzzle flash suppressor.* USA. US 08/501,370 US5596161 A. Uděleno 21.1.1997. Zapsáno 12.7.1995.
- [18] NOVESKE, John. *Flash suppression system.* USA. US 11/524,764 US7836809 B2. Uděleno 23.11.2010. Zapsáno 20.9.2006.
- [19] AR-15 Flash Hiding Test. *Thetruthaboutguns.com* [online]. 2015 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.thetruthaboutguns.com/2015/12/jeremy-s/ar-15-flash-hiding-test-2/>
- [20] SWEENEY, Patrick, Kevin. MICHALOWSKI a Dan. SHIDELER. *The Gun digest book of the AR-15.* Iola, WI: KP Books, A Division of F+W Publications, 2012. ISBN 144022868X.
- [21] KUBRICKÝ, J. *Optimalizace SLM procesu pro výrobu ústového zařízení útočné pušky.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 97 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Vtípil, Ph.D..

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9

Zkratka Význam

SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
CFD	Computational Fluid Dynamics
VUT	Vysoké učení technické
CZUB	Česká zbrojovka Uherský Brod
MKP	Metoda konečných prvků
BCC	Body centered cube
FCC	Face centered cube
STL	Stereolithography formát
HP	Hmotnostní podíl
FSI	Fakulta strojního inženýrství
TPMS	Triply periodic minimal surface

Symbol Jednotka Popis

u	[m/s]	rychlost vytékajících plynů
ρ	[kg/m ³]	hustota plynů
φ	[J/K]	entropie
x	[m]	poloha střely v hlavní
t	[s]	čas
P_{mean}	[MPa]	střední tlak
v_p	[m/s]	rychlost střely
T_{mean}	[K]	teplota plynů
a	[-]	konstanta změny objemového podílu
$t(z_2)$	[-]	parametr t v místě z_2
z_2	[mm]	z souřadnice bodu s definovaným parametrem t
b	[-]	požadovaný parametr t v místě $z = 0$
t	[-]	parametr struktury určující hmotnostní podíl
LCImax	[dB]	maximální hladina akustického tlaku

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Současné univerzální úst'ové zařízení CZUB	13
Obr. 2-1 Schéma výroby kovových dílů pomocí aditivních technologií [1]	14
Obr. 2-1 Úst'ové brzdy [4,5]	15
Obr. 2-2 Vícekomorový expanzní tlumič hluku [6]	16
Obr. 2-3 Tlumič plamene typu Cone [13]	17
Obr. 2-4 Tlumič plamene typu Duckbill [15]	17
Obr. 2-5 Tlumič plamene typu Birdcage [16]	17
Obr. 2-6 Tlumič plamene typu Vortex [16]	18
Obr. 2-7 Tlumič plamene typu Noveske [18]	18
Obr. 2-8 Žádný tlumič plamene [19]	19
Obr. 2-9 Tlumič plamene typu Duckbill [19]	19
Obr. 2-10 Tlumič plamene typu Duckbill [19]	19
Obr. 2-11 Tlumič plamene typu Vortex [19]	19
Obr. 2-12 Porovnání tlakové špičky u zbraně ráže 0,38' [9]	23
Obr. 2-13 Simulovaný tlak od zbraně ráže 0,22' [9]	23
Obr. 4-1 Koncepční varianta Vortex	25
Obr. 4-2 Struktura v koncové části zařízení	26
Obr. 4-3 Koncepční varianta Birdcage	26
Obr. 4-4 Pohled ze strany	26
Obr. 4-5 Řez zařízením	26
Obr. 4-6 Spirálová varianta s více drážkami	27
Obr. 4-7 Spirálová varianta s méně drážkami	27
Obr. 4-8 Akumulační varianta bez pláště	27
Obr. 4-9 Akumulační varianta s pláštěm	27
Obr. 4-10 Varianta se strukturou	28
Obr. 4-11 Kompenzace zdvihu	28
Obr. 4-12 Varianta s lattice structure	28
Obr. 4-13 Varianta dvoukomorová	29
Obr. 4-14 Úprava pro lepší tlumení hluku	30
Obr. 4-15 Úprava pro lepší tlumení plamene	30
Obr. 4-16 BCC buňka	30
Obr. 4-17 BCC struktura	30
Obr. 4-18 BCC-Z buňka	31
Obr. 4-19 BCC-Z buňka	31
Obr. 4-20 Ořezaná BCC struktura	31
Obr. 4-21 Detail ořezu struktury	31
Obr. 4-22 Rotační BCC struktura bez úprav	31
Obr. 4-23 Rotační BCC struktura s gradientní výškou buňky	31
Obr. 4-24 Gradientní změna průměru prutu	32
Obr. 4-25 Gradientní změna hustoty struktury	32
Obr. 4-26 Gyroidní buňka	32
Obr. 4-27 Gyroidní struktura	32
Obr. 4-28 Double gyroid buňka	33
Obr. 4-29 Double gyroid struktura	33
Obr. 4-30 Diamond buňka	33

Obr. 4-31	Diamond struktura	33
Obr. 4-32	Lidinoid buňka	33
Obr. 4-33	Lidinoid struktura	33
Obr. 5-1	Porovnání vypočtených hodnot tlaku s experimentálními hodnotami	37
Obr. 5-2	Generování pole BCC buněk	38
Obr. 5-3	Gyroidní struktura vygenerovaná v programu Rhinoceros	39
Obr. 5-4	Gyroidní struktura upravená v programu GOM Inspect	39
Obr. 5-5	Gyroidní struktura ořezaná v programu Nettfab Studio Professional	40
Obr. 5-6	Výsledná gyroidní buňka	41
Obr. 5-7	Gradientní gyroidní struktura – pohled z boku	43
Obr. 5-8	Gradientní gyroidní struktura	43
Obr. 5-9	Buňka pro vzorky na CFD	44
Obr. 5-10	Rozměry vzorku pro CFD	44
Obr. 5-11	Sít pro vzorek na CFD	45
Obr. 5-12	Detail sítě	45
Obr. 5-13	Kvalita sítě	45
Obr. 5-14	Histogram kvality sítě	46
Obr. 5-15	Označení ploch jako okrajových podmínek	46
Obr. 5-16	Ukázka obecného nastavení programu ANSYS Fluent	47
Obr. 5-17	Chybné uzly ve vzorku struktury	49
Obr. 5-18	Turbulentní kinetická energie	50
Obr. 5-19	Tlak plynů	50
Obr. 5-20	Rychlost proudění plynů	51
Obr. 5-21	Proudnice plynů	51
Obr. 5-22	Parametr $t = 0$	53
Obr. 5-23	Parametr $t = 0,7$	53
Obr. 5-24	Geometrie pro odladění CFD analýz	57
Obr. 5-25	Okrajová podmínka na hranici okolí	57
Obr. 5-26	Vývoj tlaku v čase	58
Obr. 5-27	Vývoj rychlosti v čase	58
Obr. 5-28	Script pro řízení dynamické sítě	59
Obr. 5-29	Vliv střely na tlak v čase $t = 0,2$ ms	59
Obr. 5-30	Vliv střely na tlak v čase $t = 0,2$ ms u ústového zařízení	60
Obr. 5-31	Dvoukomorová varianta, se střelou, čas $t = 0,2$ ms	60
Obr. 5-32	Zkrácená dvoukomorová varianta, se střelou, čas $t = 0,2$ ms	61
Obr. 5-33	Otevřená dvoukomorová varianta, se střelou, čas $t = 0,2$ ms	61
Obr. 5-34	Otevřená zkrácená dvoukomorová varianta, se střelou, čas $t = 0,2$ ms	61
Obr. 5-35	Porovnání rychlosti proudění při použití vortexu a bez něj	62
Obr. 5-36	Konečnoprvková síť pro výpočet zatížení	62
Obr. 5-37	Histogram kvality sítě	63
Obr. 5-38	Rozložení tlaku v zařízení	63
Obr. 5-39	První řada buněk	64
Obr. 5-40	Konečnoprvková síť	64
Obr. 5-41	Okrajové podmínky	64
Obr. 5-42	Napětí von-Mises na začátku struktury	65
Obr. 5-43	Síť varianty s přepážkami	65
Obr. 5-44	Okrajové podmínky varianty s přepážkami	66
Obr. 5-45	Napětí von-Mises pro variantu s přepážkami	66

Obr. 5-46 Napětí von-Mises pro druhou variantu	67
Obr. 5-47 Základní rozměry úst'ového zařízení	68
Obr. 5-48 Základní rozměry výplňové struktury	68
Obr. 5-49 Gradientní změna parametru t	69
Obr. 5-50 Čelo zařízení	69
Obr. 5-51 Vortex v úst'ovém zařízení	69
Obr. 5-52 Finální varianta univerzálního úst'ového zařízení	70
Obr. 5-53 Vytisknuté úst'ové zařízení na platformě	71
Obr. 5-54 Úst'ové zařízení namontované na zbraní	71
Obr. 5-55 Zbraň CZ Bren 2 ve zkušebním stojanu	72
Obr. 5-56 Postup vyhodnocení plamene	73
Obr. 5-57 Plamen bez úst'ového zařízení	74
Obr. 5-58 Tlumič plamene CZUB	74
Obr. 5-59 Univerzální úst'ové zařízení výstřel č.1	74
Obr. 5-60 Univerzální úst'ové zařízení výstřel č.2	74
Obr. 5-61 Záběr z vysokorychlostní kamery na referenční body	75
Obr. 5-62 Měřicí sestava	77
Graf 5-1 Závislost tlaku v hlavni na čase	36
Graf 5-2 Závislost rychlosti střely na čase	36
Graf 5-3 Závislost teploty plynů na čase	36
Graf 5-4 Závislost hmotnostního podílu na parametru t – Gyroid	42
Graf 5-5 Závislost hmotnostního podílu na parametru t – Diamond	42
Graf 5-6 Kinetická energie turbulencí podél vzorku při různém počtu iterací	49
Graf 5-7 Klouzavý průměr pro BCC strukturu	52
Graf 5-8 Distribuce kinetické energie turbulencí podél vzorku pro různé struktury (k - ϵ)	52
Graf 5-9 Distribuce kinetické energie turbulencí podél vzorku pro různé struktury	52
Graf 5-10 Vliv parametru t na kinetickou energii turbulencí	54
Graf 5-11 Integrace kinetické energie turbulencí pro různé parametry t	55
Graf 5-12 Vliv parametru t na rozložení tlaku	55
Graf 5-13 Vliv velikosti buňky na kinetickou energii turbulencí	55
Graf 5-14 a, b Integrace kinetické energie turbulencí pro velikosti buňky	56
Graf 5-15 Úhlové výchylky zbraně pro jednotlivá zařízení	76
Graf 5-16 Posun zbraně pro jednotlivá zařízení	76
Graf 5-17 Měření hluku – umístění za střelcem	78
Graf 5-18 Měření hluku – umístění v úrovni střelce	79

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Souhrn varianty Vortex	25
Tab. 4-2	Souhrn varianty Birdcage	26
Tab. 4-3	Souhrn spirálové varianty	27
Tab. 4-4	Souhrn akumulární varianty	28
Tab. 4-5	Souhrn varianty se strukturou	29
Tab. 4-6	Souhrn varianty dvoukomorové	30
Tab. 5-1	Vstupní parametry vnitřní balistiky	35
Tab. 5-2	Hodnoty důležitých veličin při opuštění hlavně střelou	37
Tab. 5-3	Konstanty pro turbulentní model $k-\epsilon$	47
Tab. 5-4	Konstanty pro turbulentní model Reynoldsova napětí	47
Tab. 5-5	Vlastnosti vzduchu z databáze programu Ansys Fluent	48
Tab. 5-6	Analyzované hodnoty parametru t	53
Tab. 5-7	Analyzované velikosti základní buňky	53
Tab. 5-8	Koeficienty bezpečnosti	67
Tab. 5-9	Základní parametry tisku [21]	70
Tab. 5-10	Nastavení fotoaparátu Canon EOS 500D	72
Tab. 5-11	Redukce plamene	74
Tab. 5-12	Kompenzace zdvihu	76
Tab. 5-13	Redukce zpětného rázu	77
Tab. 5-14	Tlumení hluku	79

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Grafy vnitřní balistiky

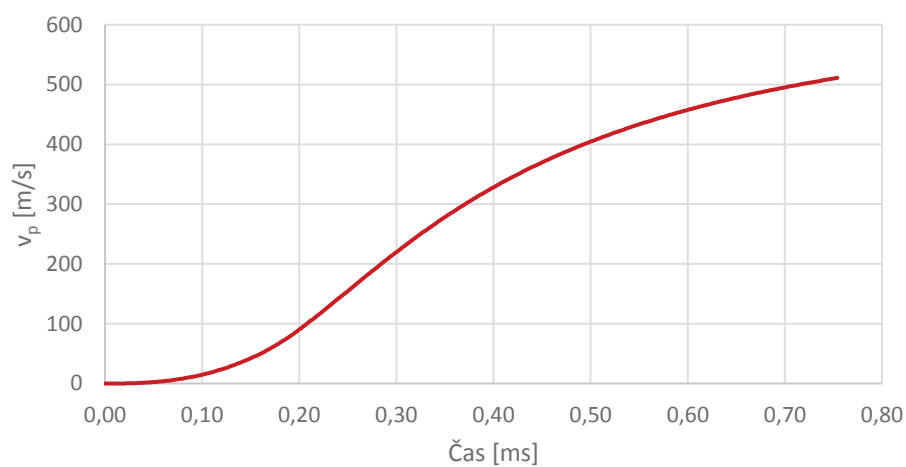
Příloha 2 – Výsledky CFD analýz

Příloha 3 – Vyhodnocení výskytu plamene

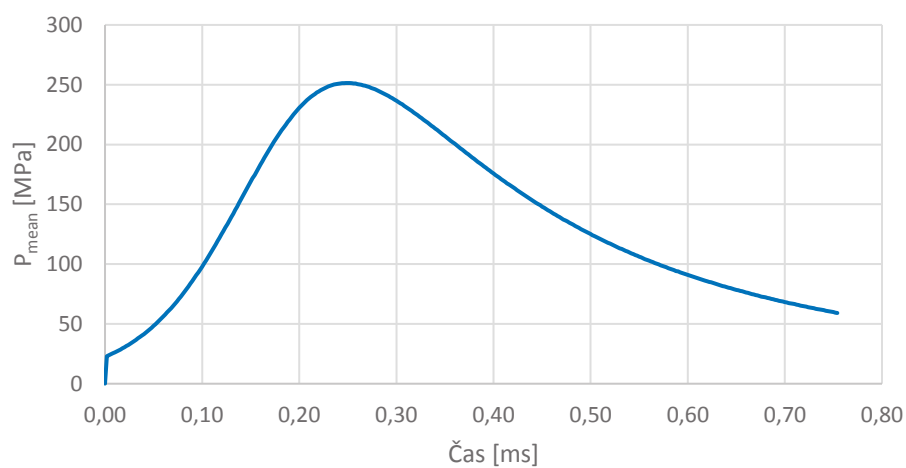
Příloha 4 – Grafy měření hluku

PŘÍLOHA 1 – GRAFY VNITŘNÍ BALISTIKY

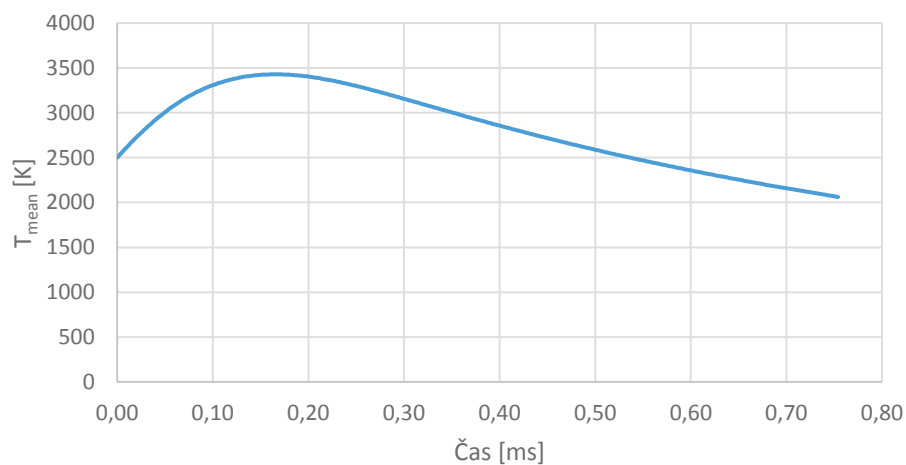
Rychlost střely na čase



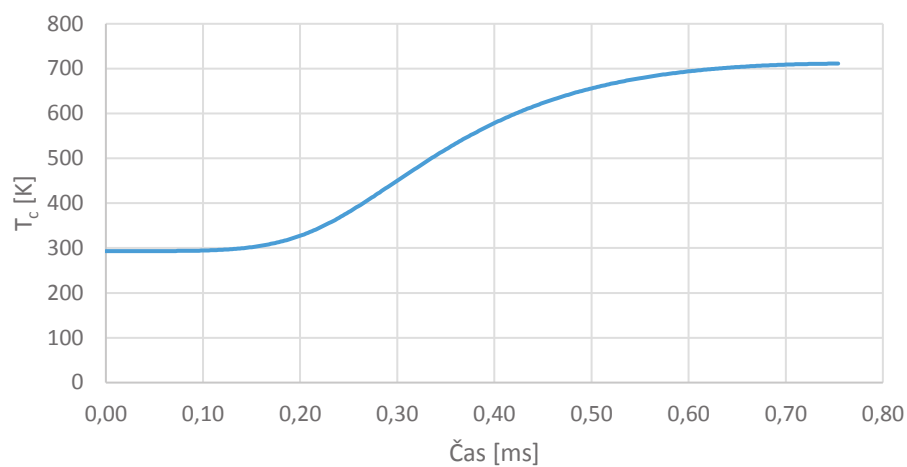
Tlak na čase



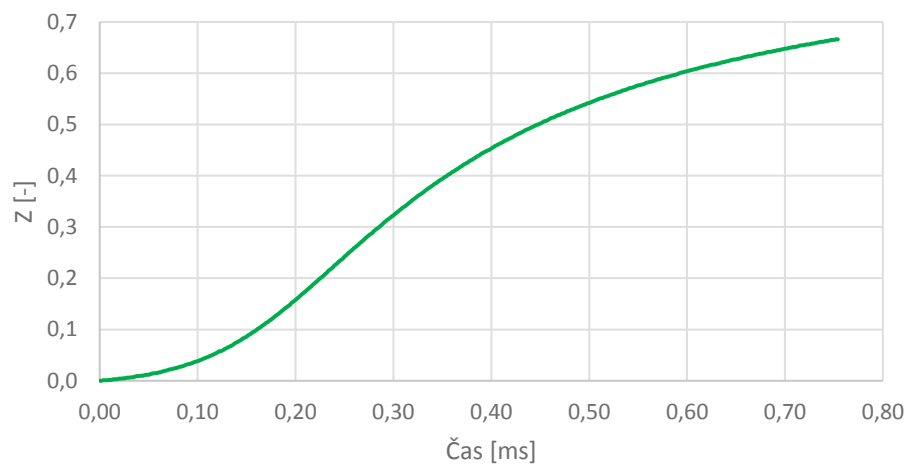
Teplota plynů na čase



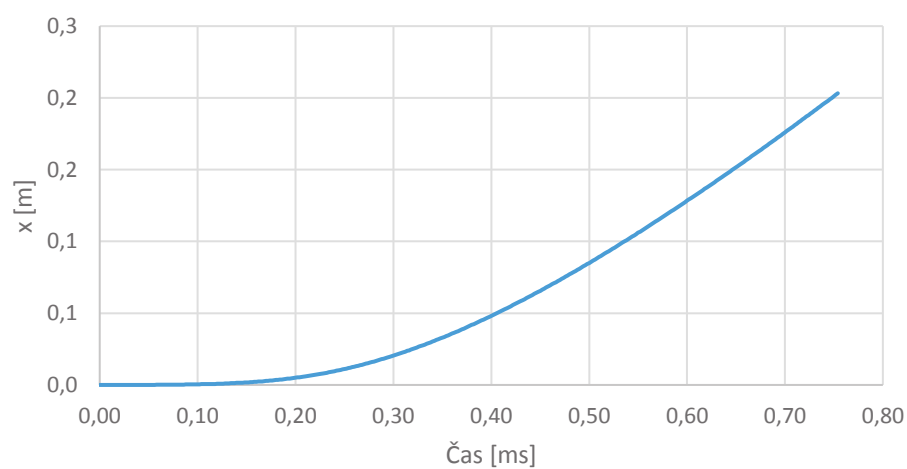
Teplota stěny na čase



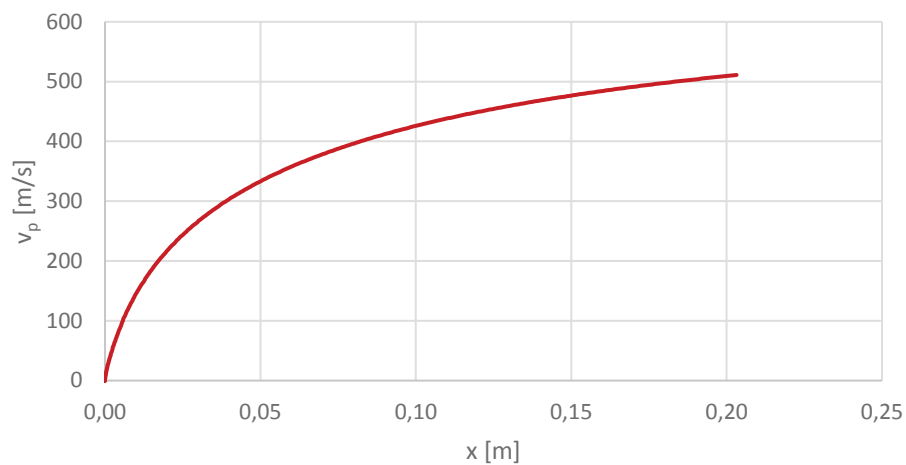
Spálená hmota na čase



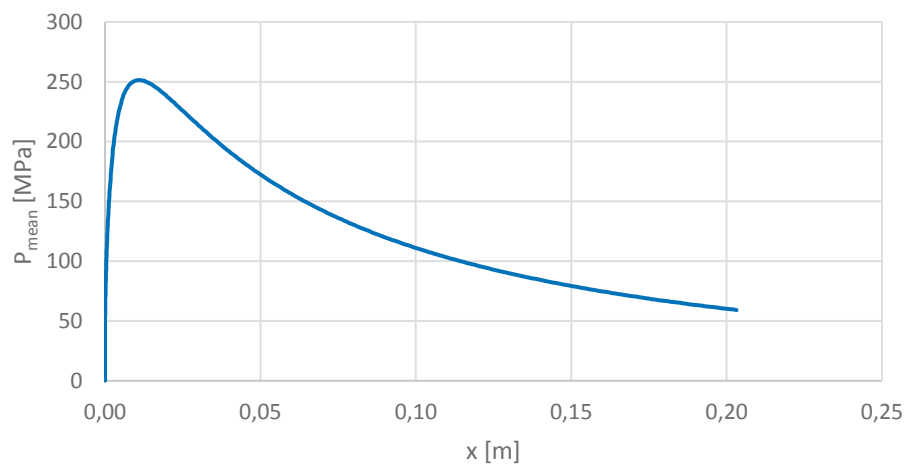
Dráha na čase



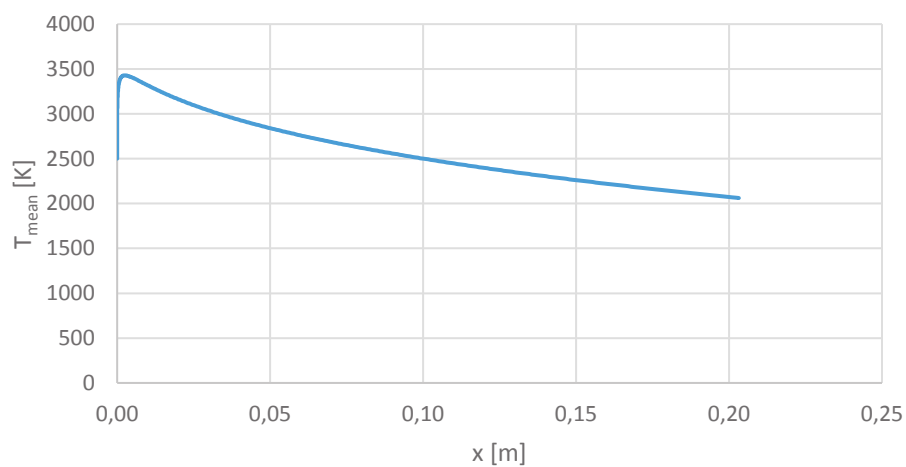
Rychlost střely na dráze



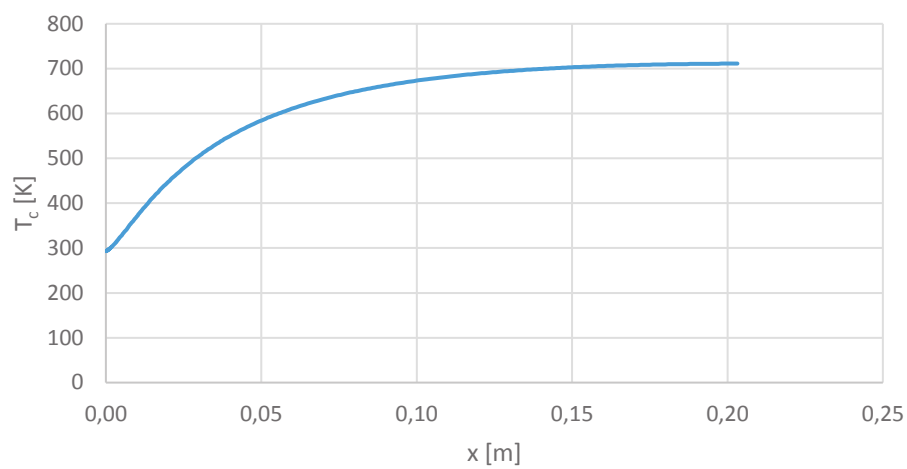
Tlak na dráze



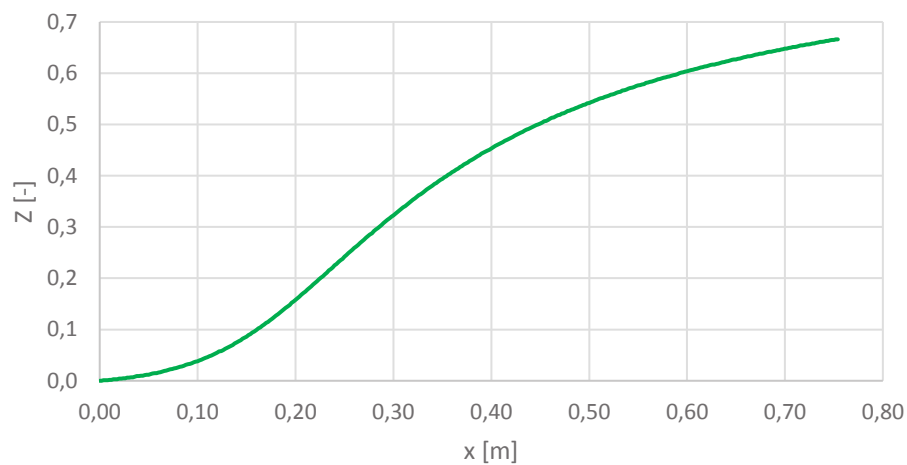
Teplota plynů na dráze



Teplota stěny na dráze

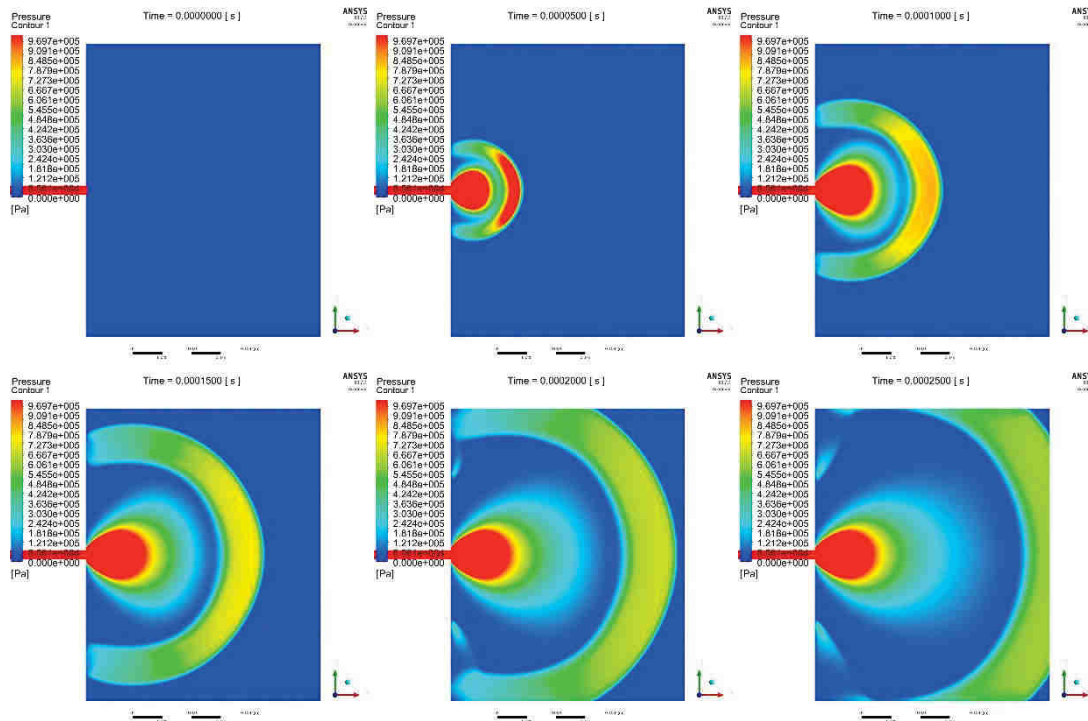


Spálená hmota na dráze

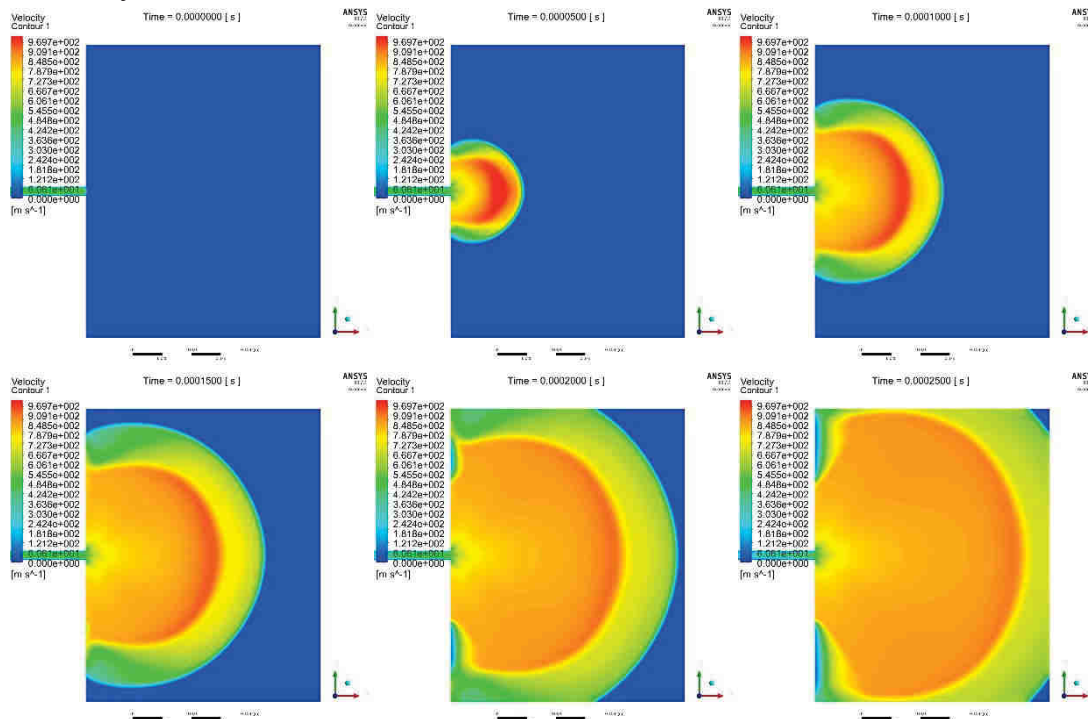


PŘÍLOHA 2 – VÝSLEDKY CFD ANALÝZ

CFD analýza výstřelu bez úst'ového zařízení, bez střely
Průběh tlaku:

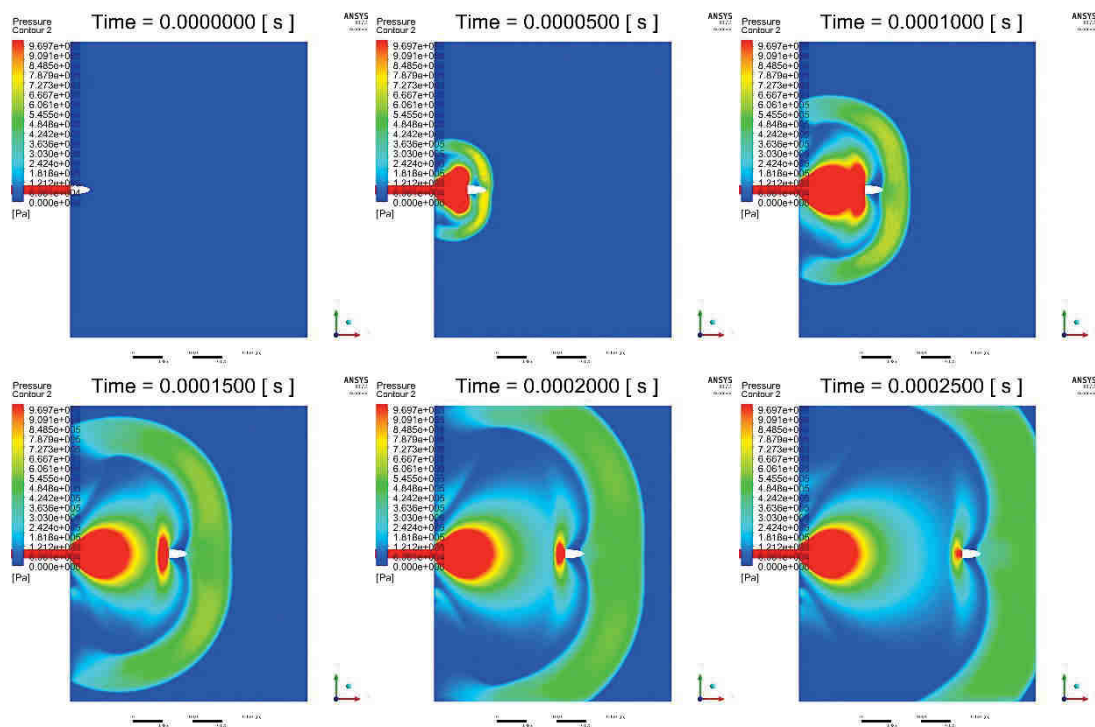


Průběh rychlostí:

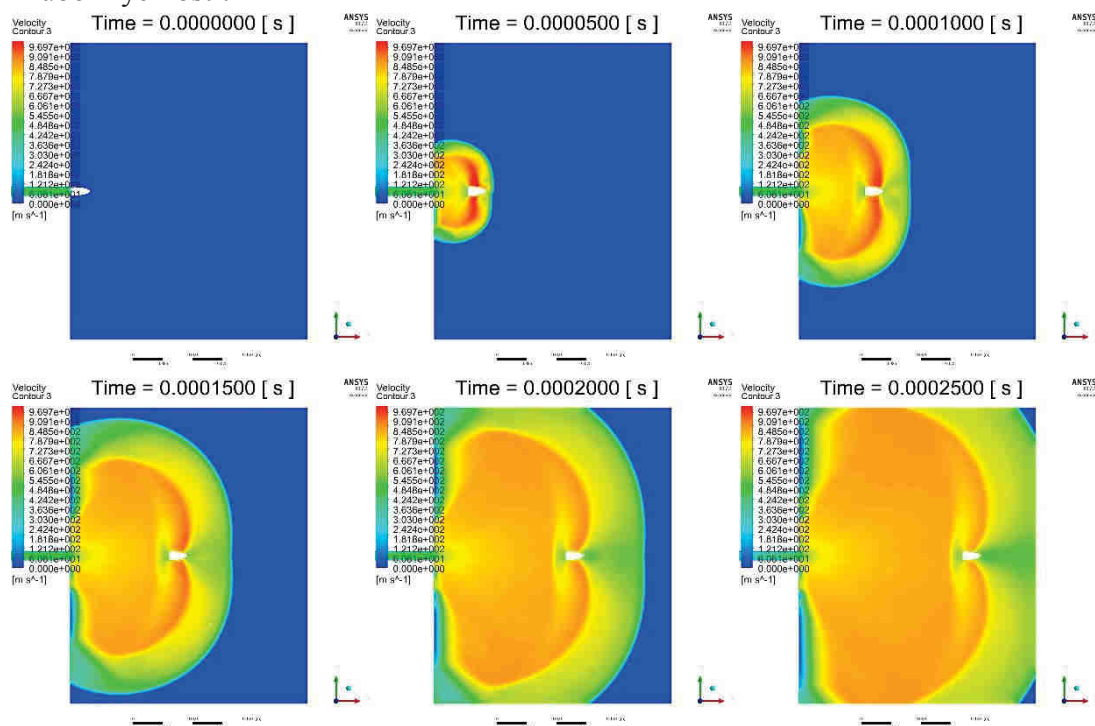


CFD analýza výstřelu bez úst'ového zařízení, se střelou

Průběh tlaku:

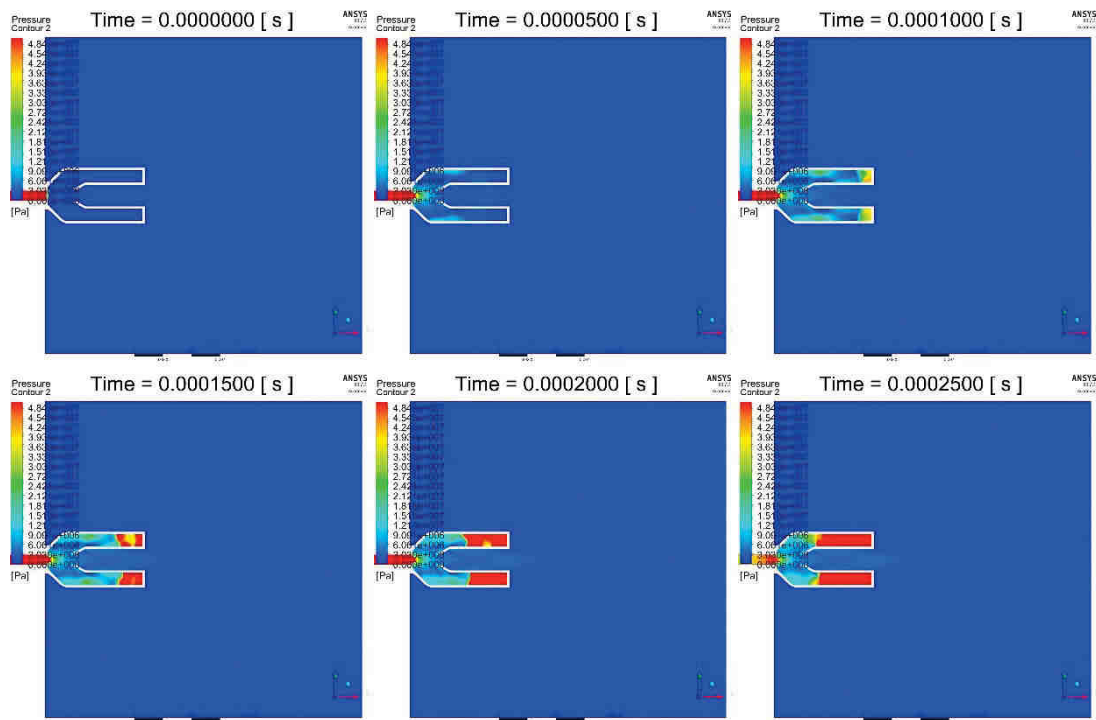


Průběh rychlostí:

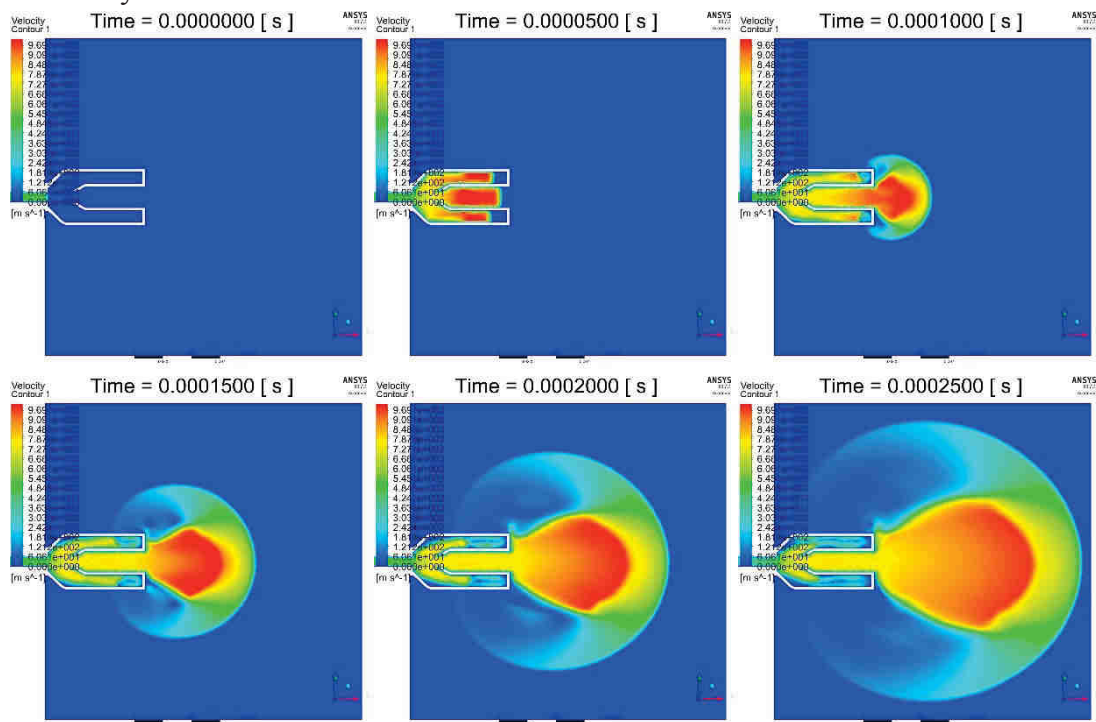


CFD analýza výstřelu při použití dvoukomorové varianty, bez střely

Průběh tlaku:

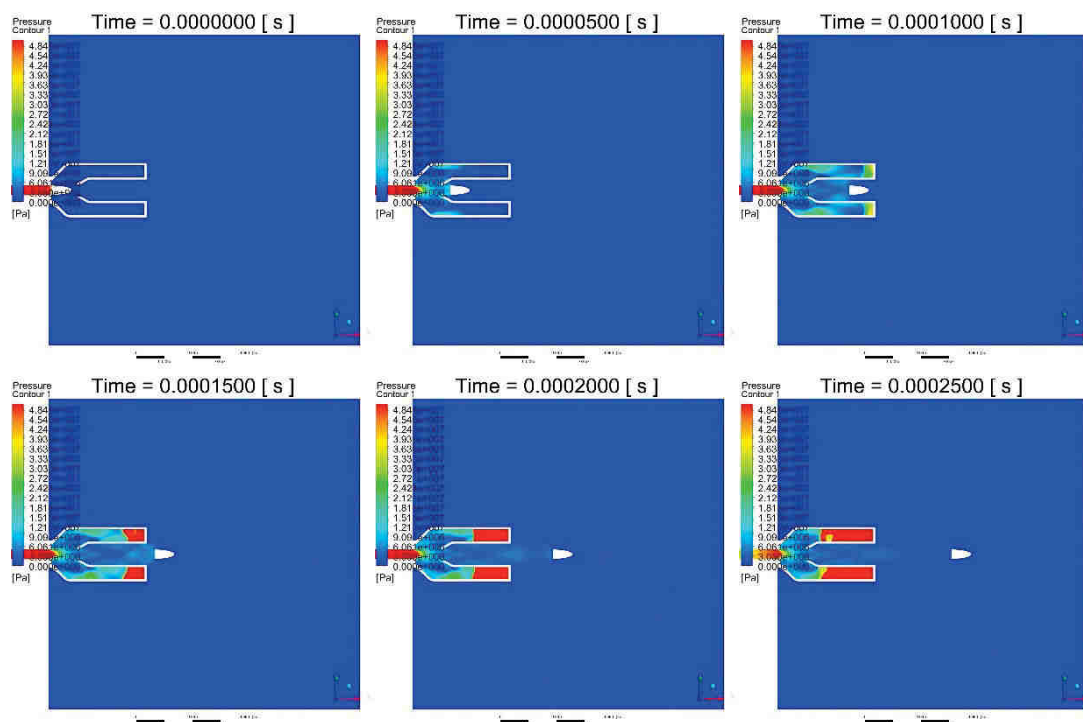


Průběh rychlosti:

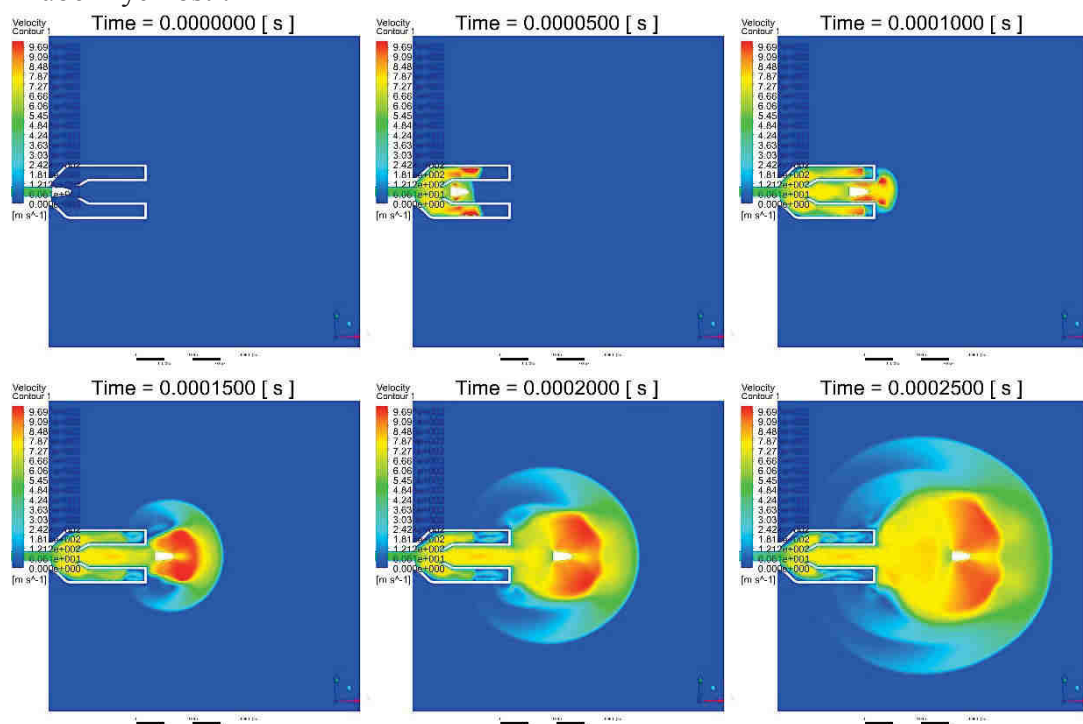


CFD analýza výstřelu při použití dvoukomorové varianty, se střelou

Průběh tlaku:

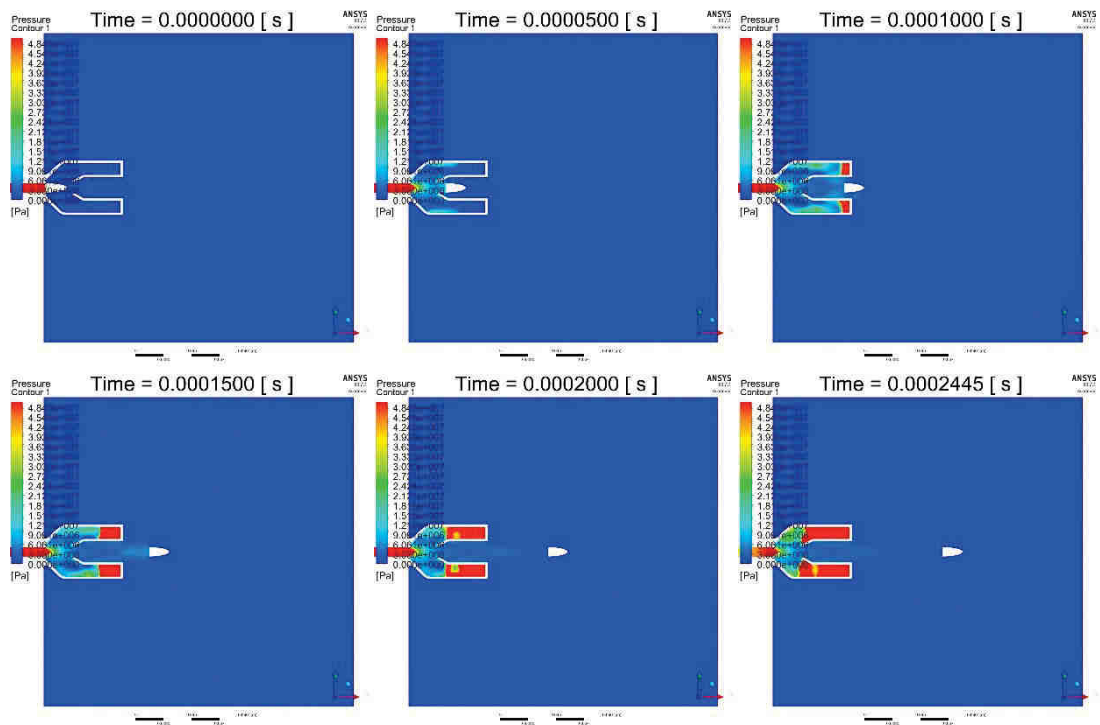


Průběh rychlostí:

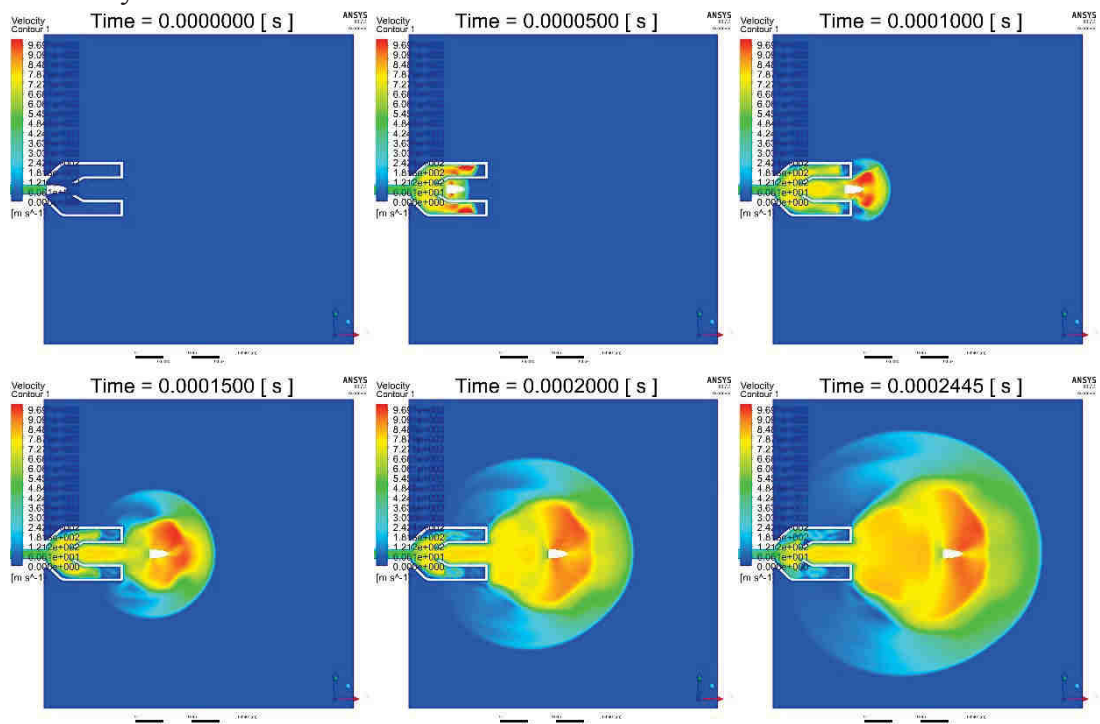


CFD analýza výstřelu při použití zkrácené dvoukomorové varianty, se střelou

Průběh tlaku:

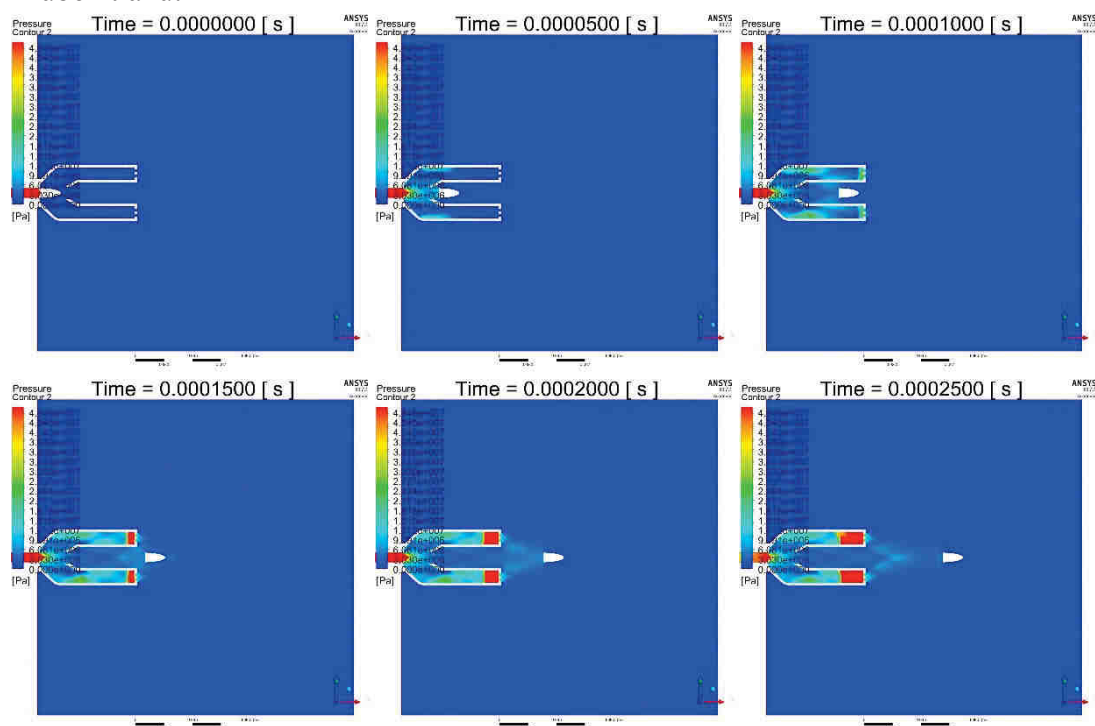


Průběh rychlosti:

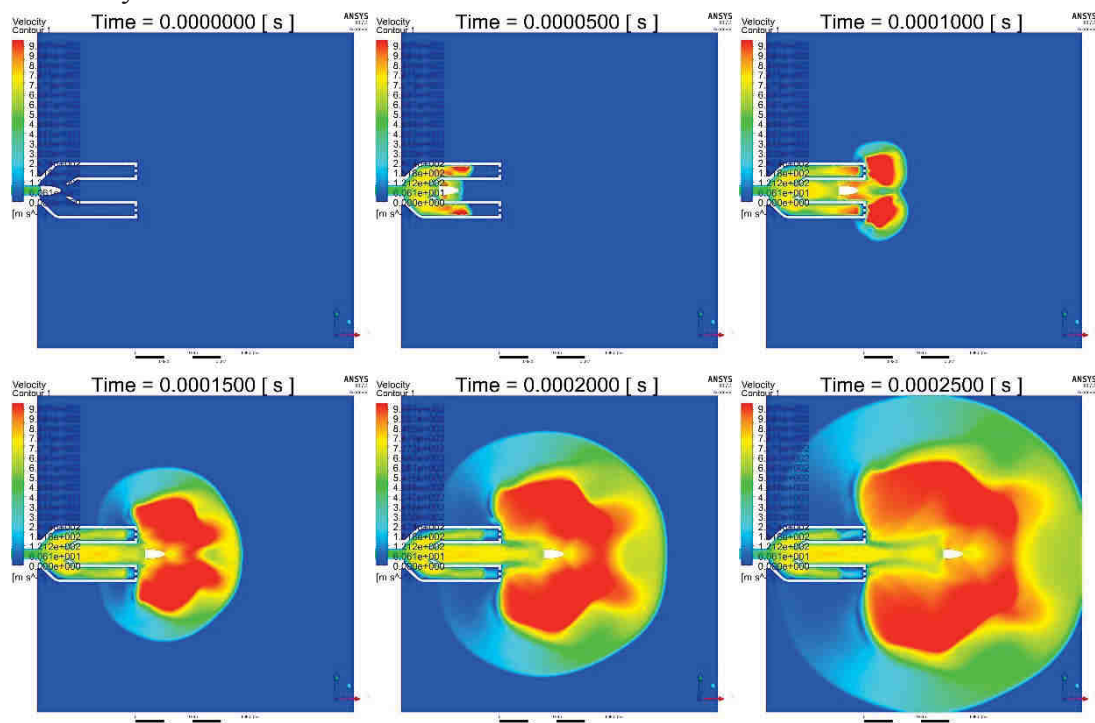


CFD analýza výstřelu při použití otevřené dvoukomorové varianty, se střelou

Průběh tlaku:

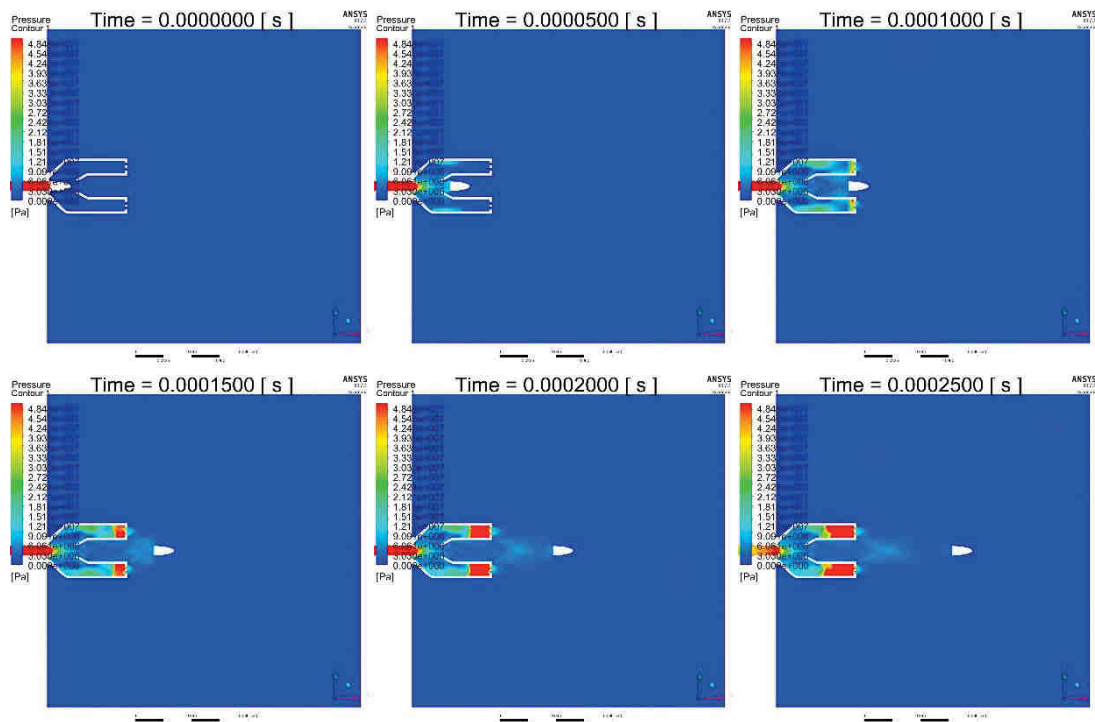


Průběh rychlostí:

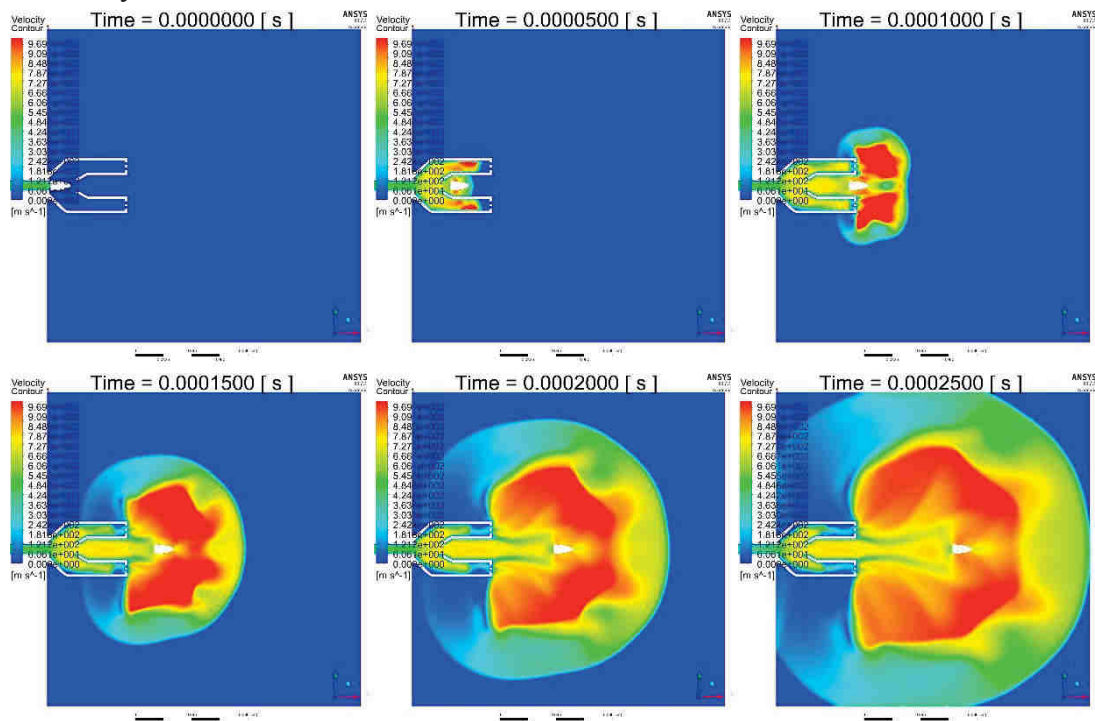


CFD analýza výstřelu při použití otevřené zkrácené dvoukomorové varianty, se střelou

Průběh tlaku:

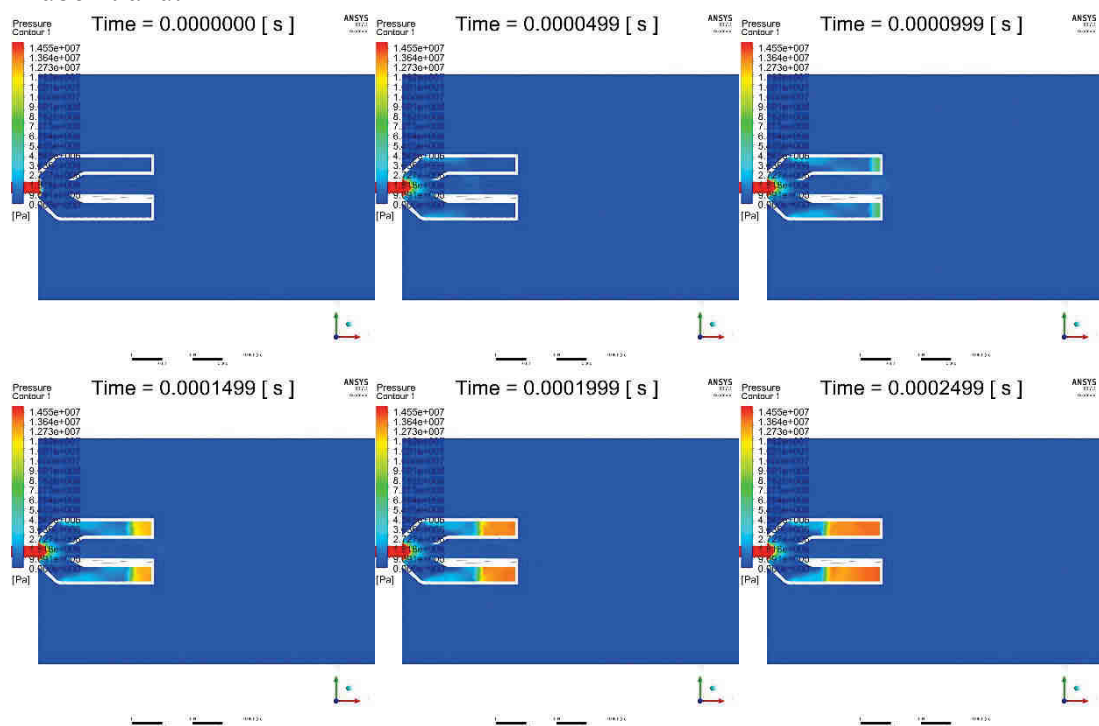


Průběh rychlosti:

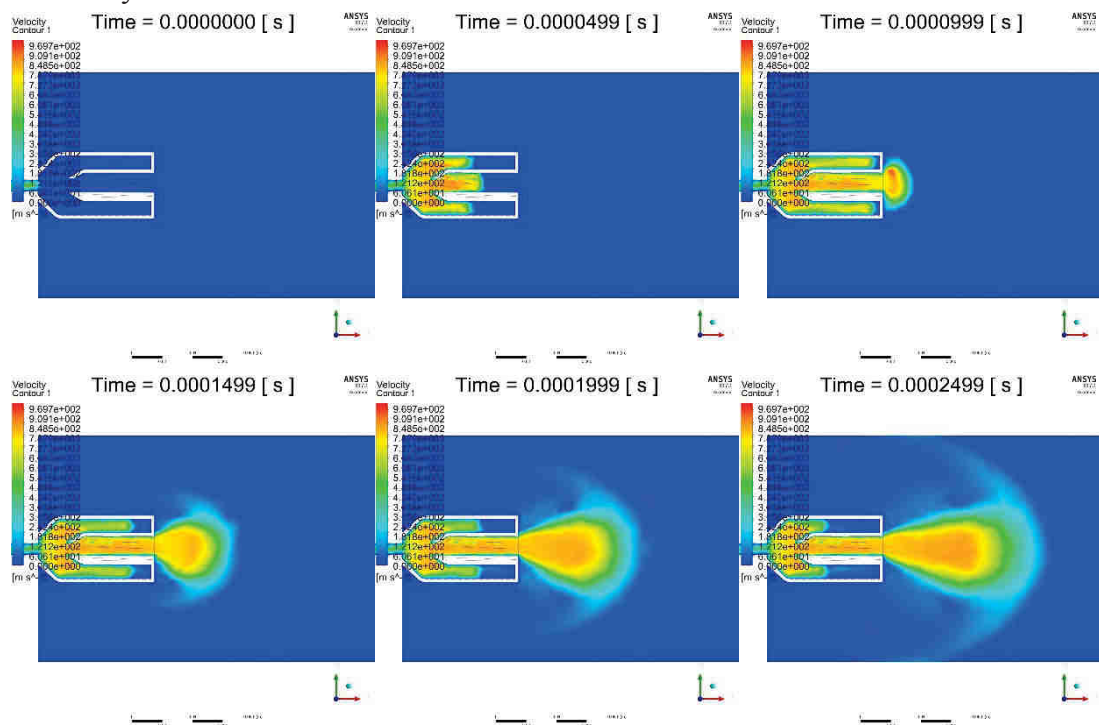


CFD analýza výstřelu při použití vortexu na dvoukomorové variantě, bez střely

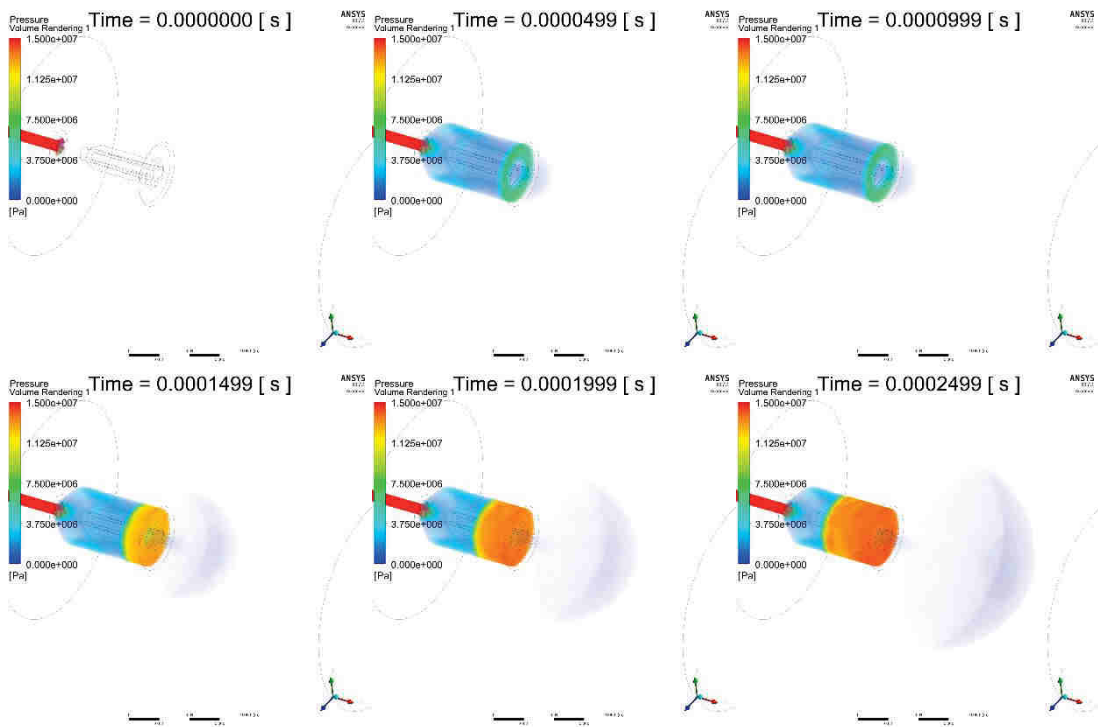
Průběh tlaku:



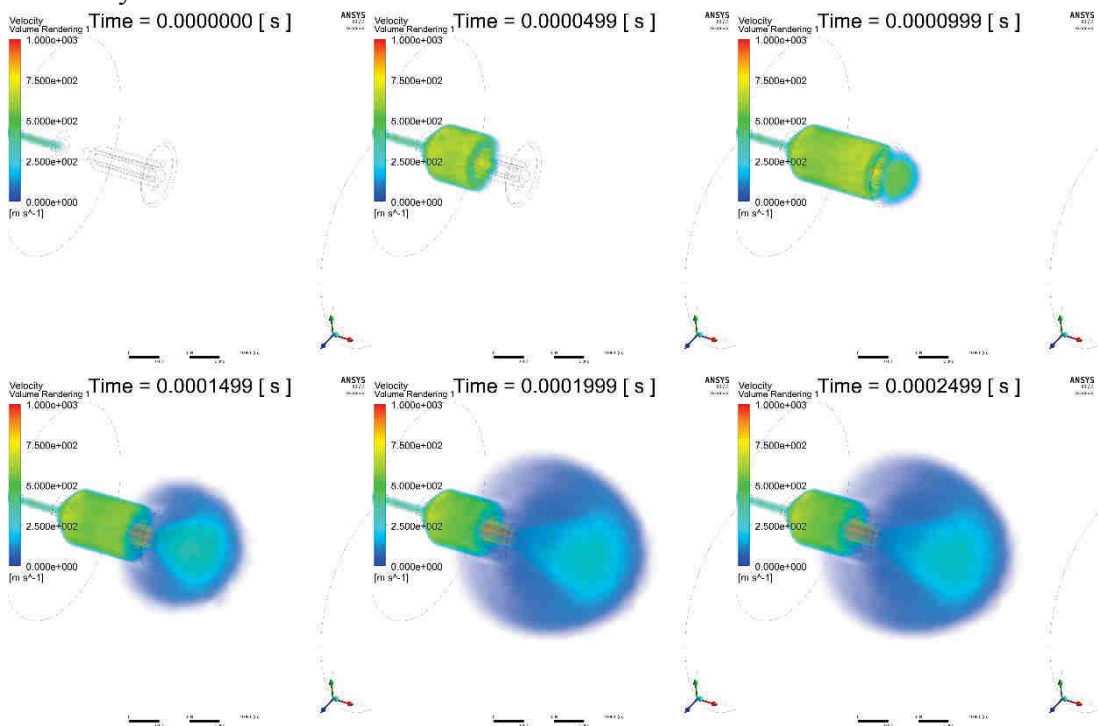
Průběh rychlostí:



Pressure Volume Rendering 1 Time = 0.0000000 [s] ANSYS 15.0 Pressure Volume Rendering 1 Time = 0.0000499 [s] ANSYS 15.0 Pressure Volume Rendering 1 Time = 0.0000999 [s] ANSYS 15.0

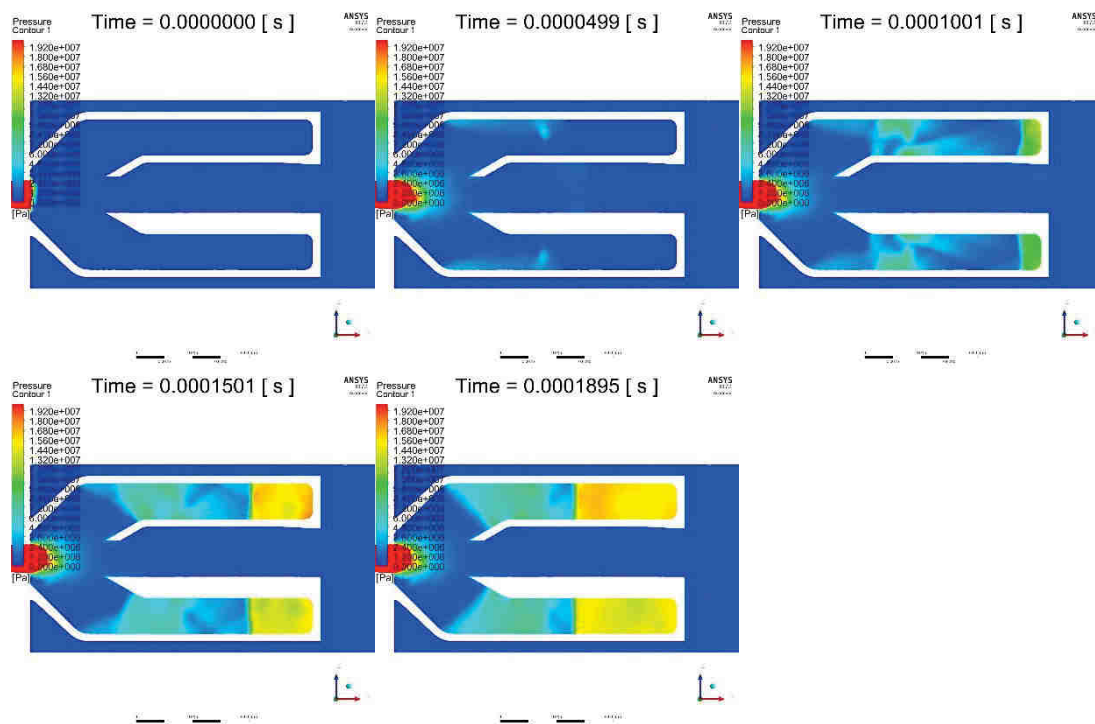


Průběh rychlostí:

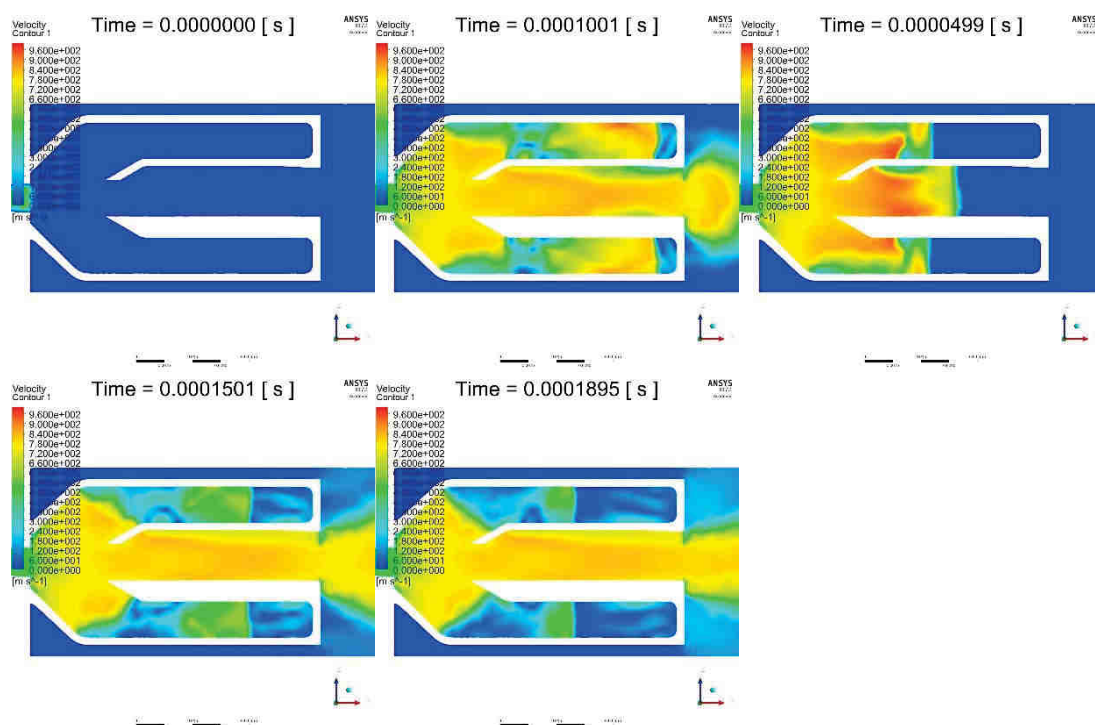


CFD analýza výstřelu pro výpočet zatížení zařízení, bez střely

Průběh tlaku:

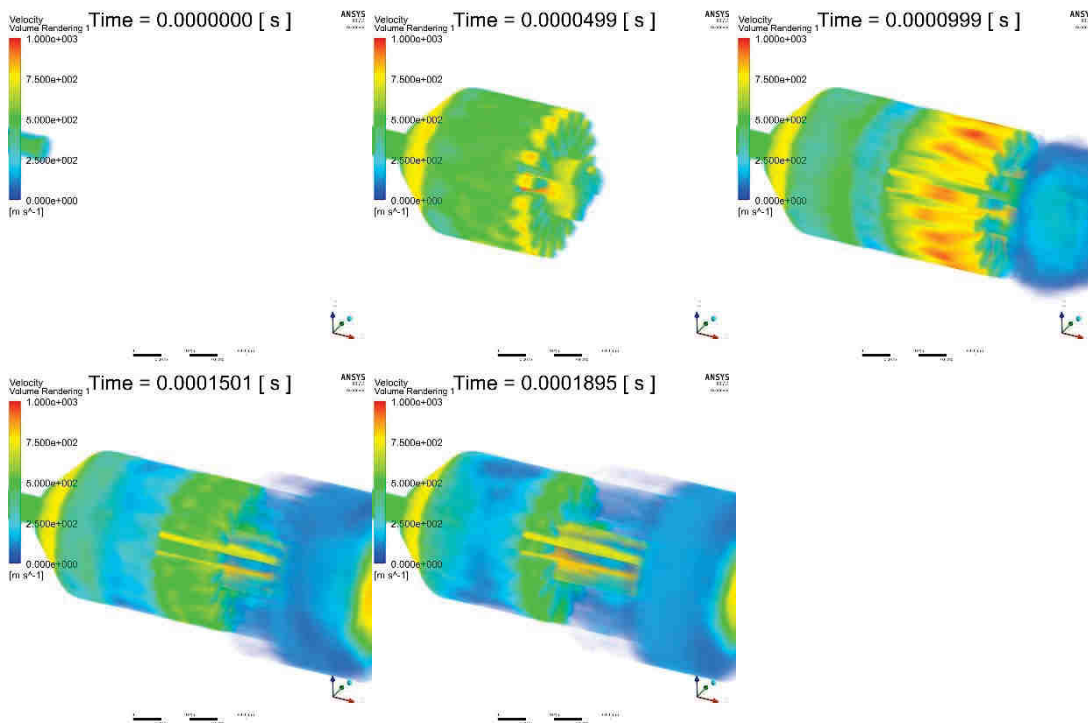
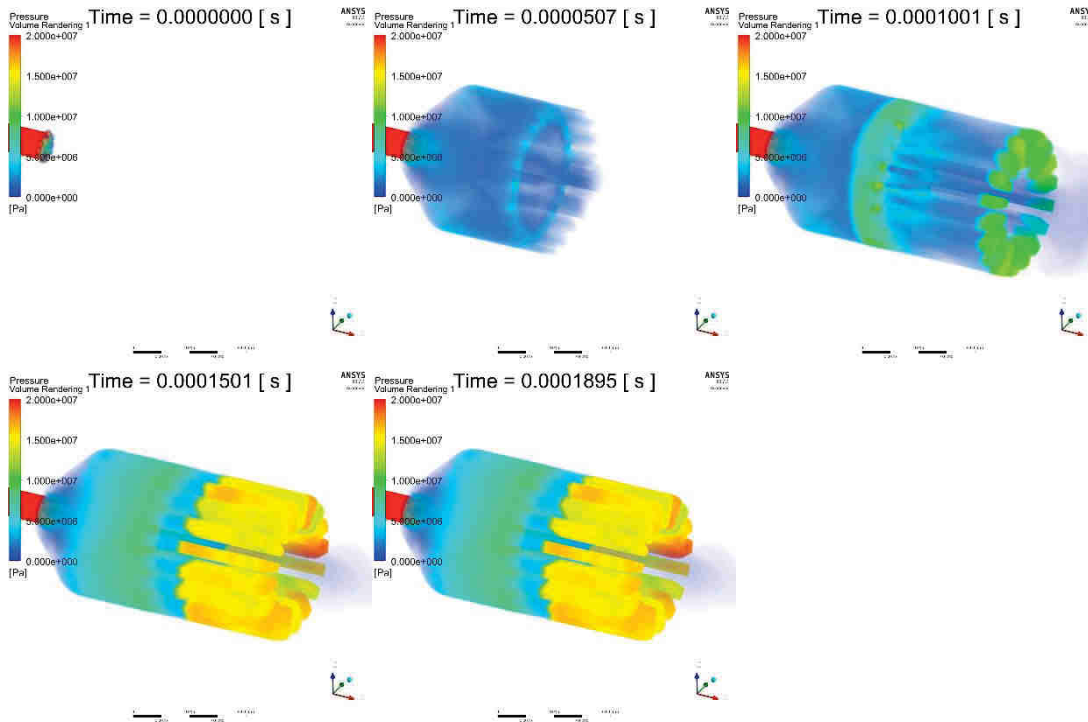


Průběh rychlostí:



Průběh tlaku:

Pressure Time = 0.0
Volume Rendering 1

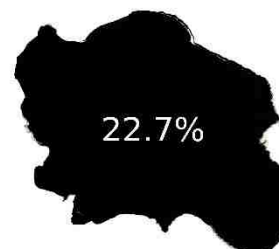


PŘÍLOHA 3 – VYHODNOCENÍ VÝSKYTU PLAMENE

Bez úst'ového zařízení

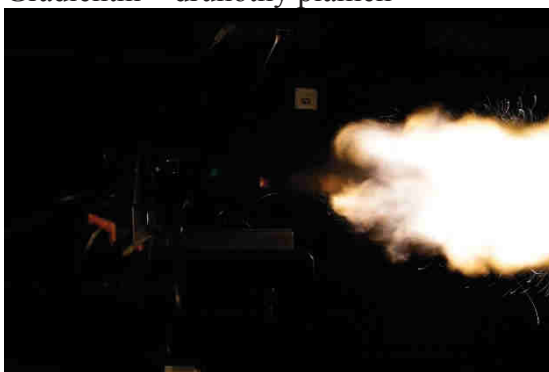


77.3%



22.7%

Gradientní – druhotný plamen



90.2%



9.8%

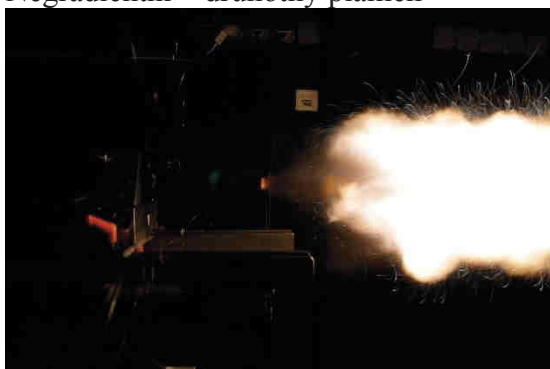
Gradientní – bez druhotného plamene



99.9%

◆ 0.1%

Negradientní – druhotný plamen



87.8%



Tlumič plamene



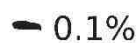
99.1%



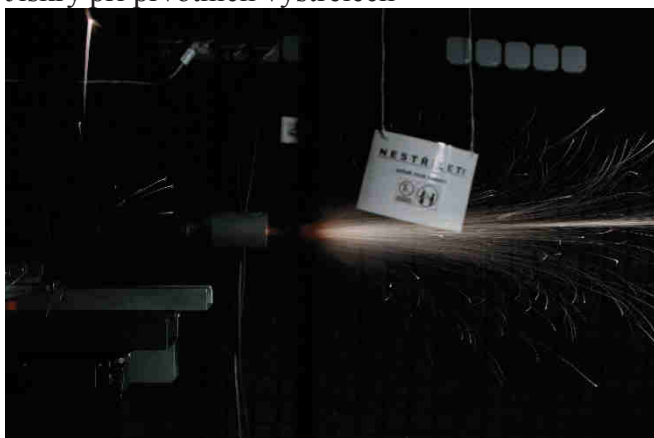
Gradientní – ráže 5,56x45 mm NATO



99.9%

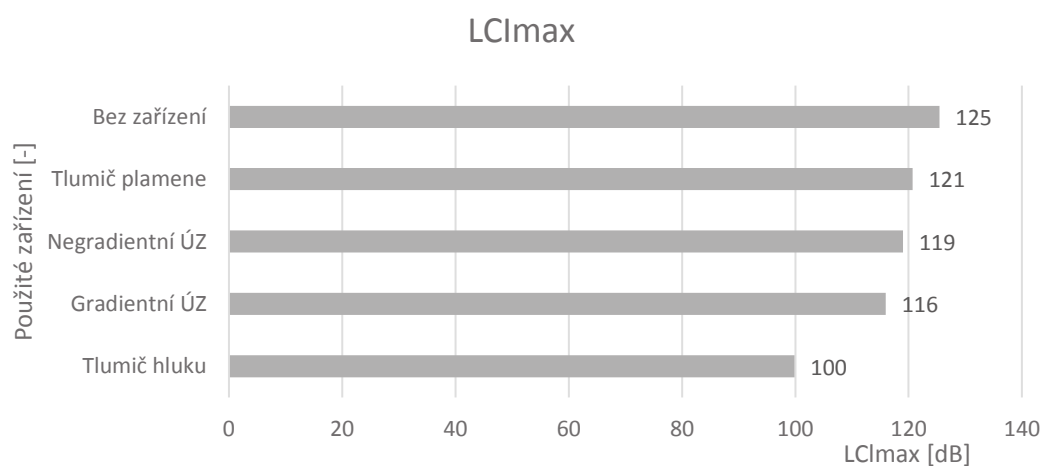
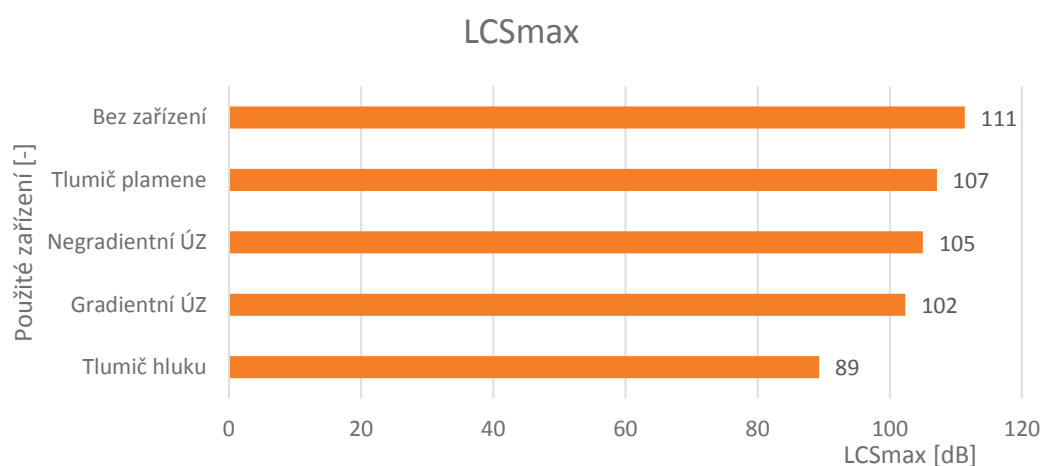
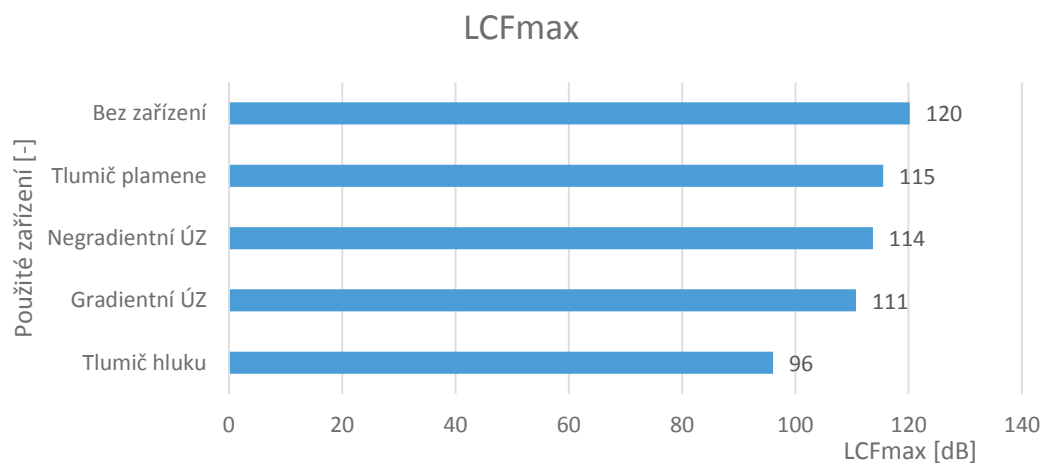


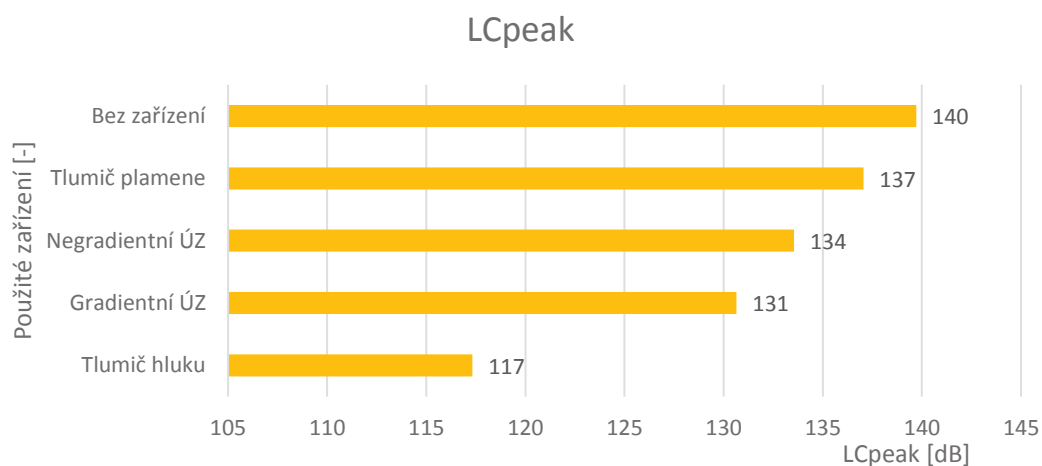
Jiskry při prvotních výstřelech



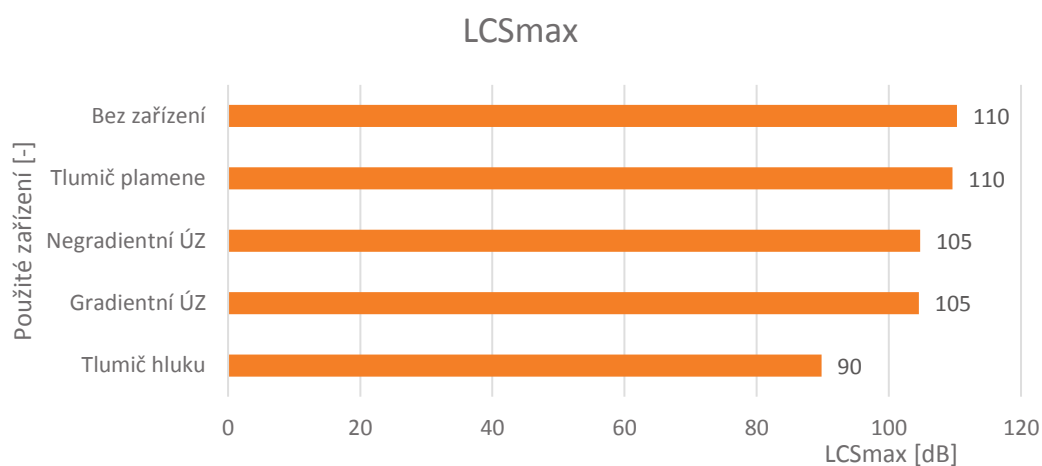
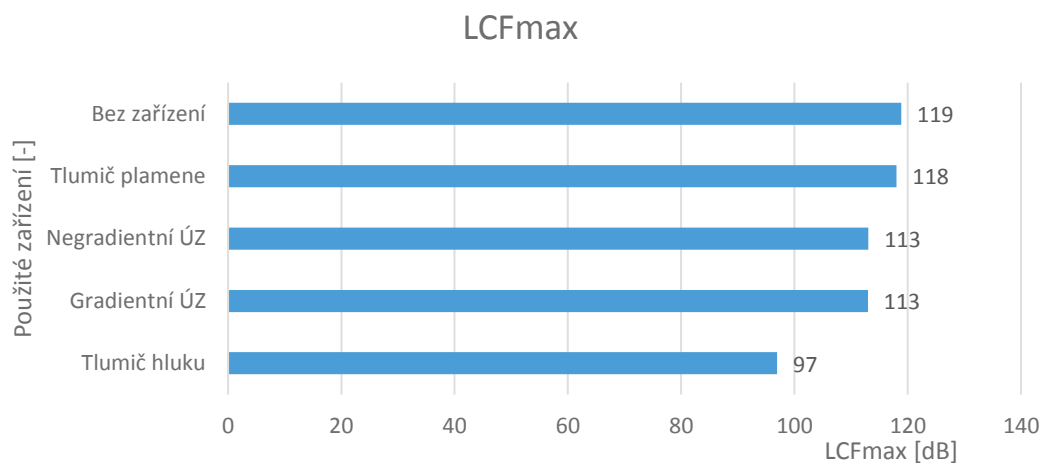
PŘÍLOHA 4 – GRAFY MĚŘENÍ HLUKU

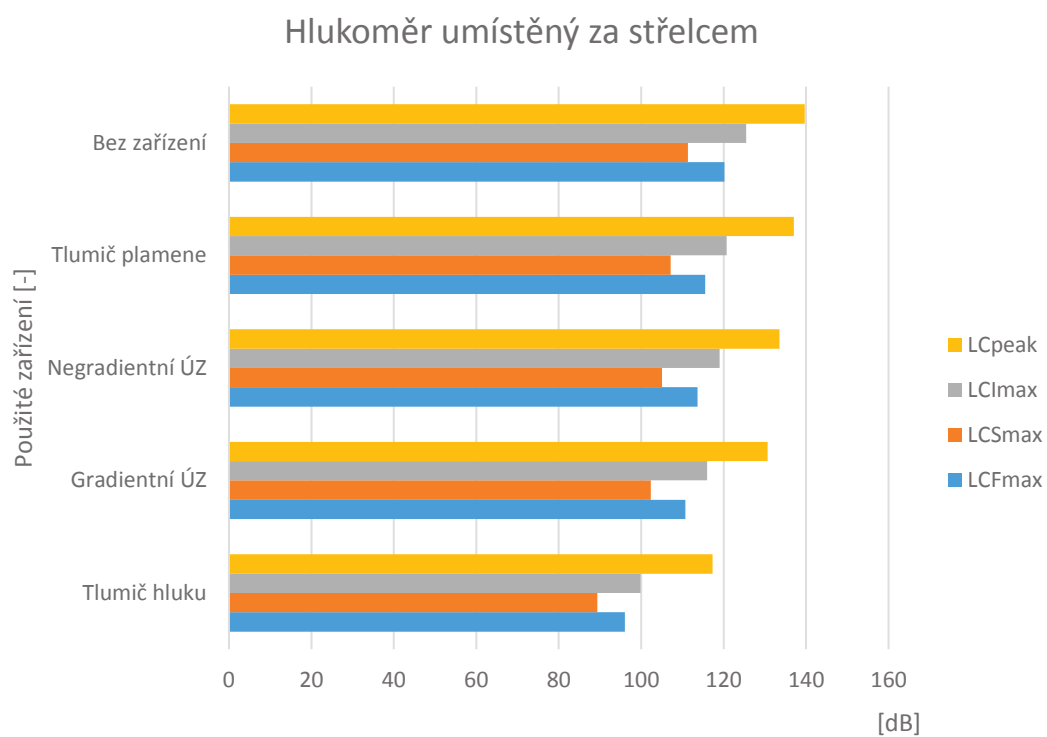
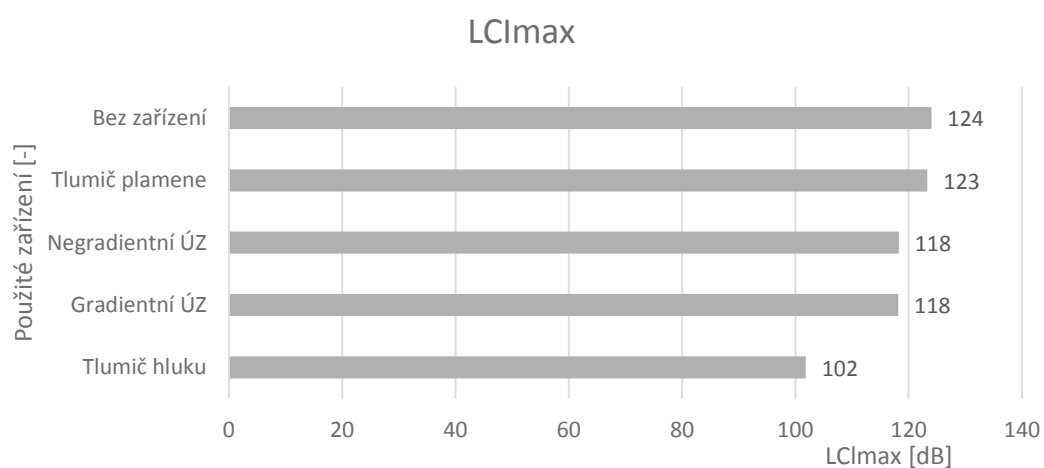
Umístění hlukoměru za střelcem:

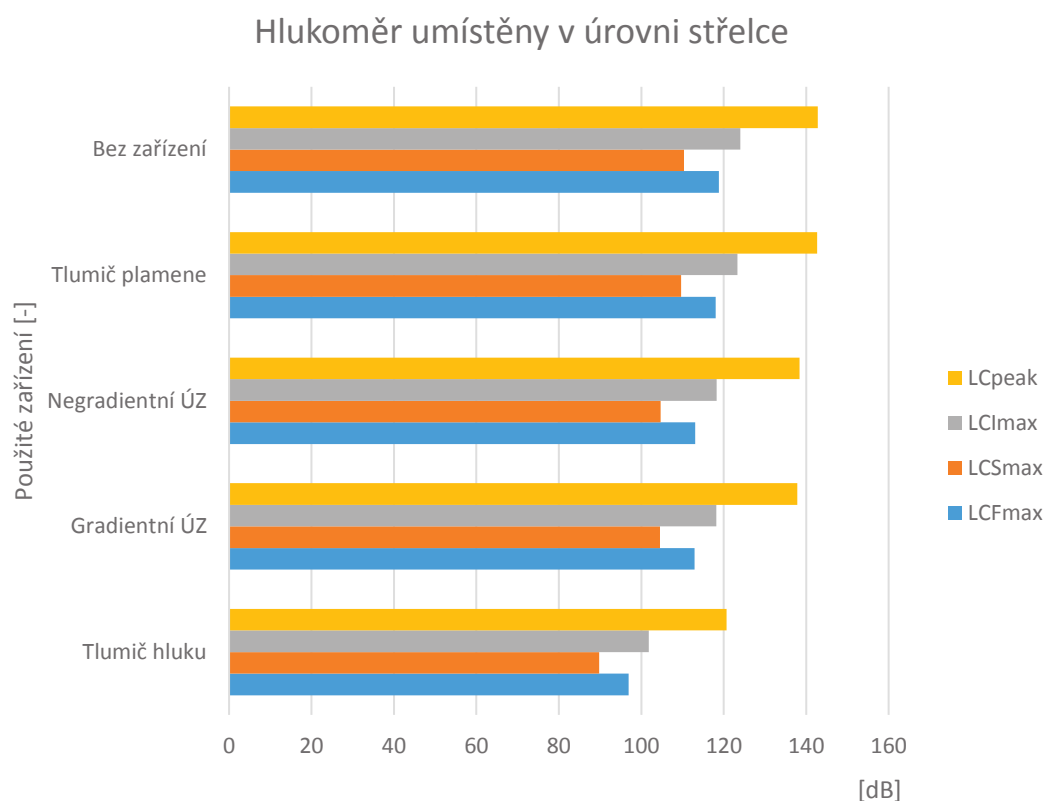




Umístění hlukoměru v úrovni střelce:







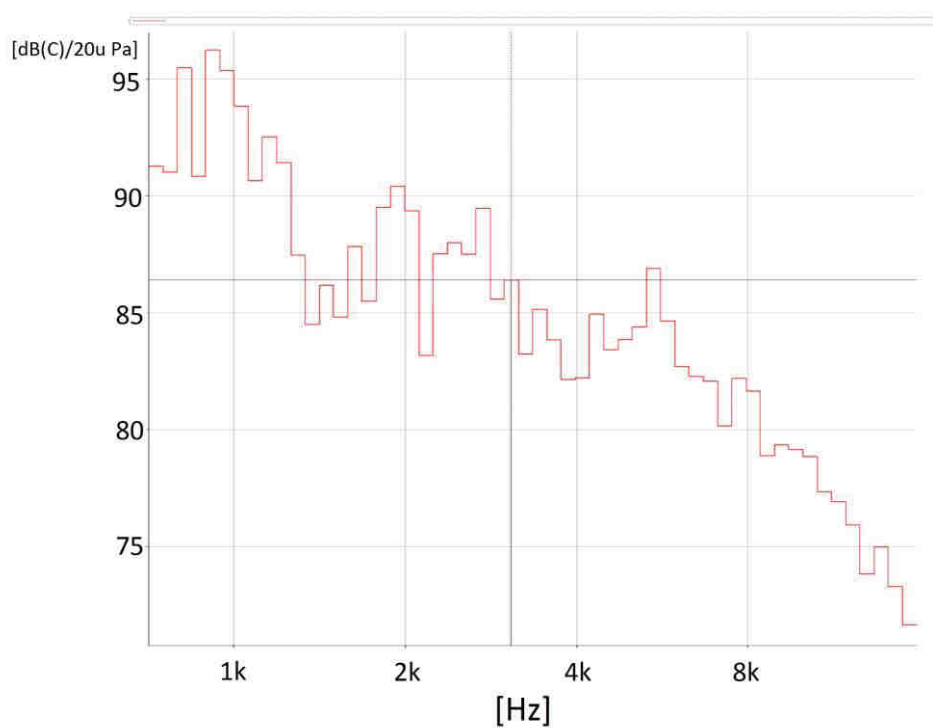
Aritmetické průměry naměřených hodnot:

Umístění	Typ zařízení	LCFmax	LCSmax	LCImax	LCpeak
Za střelcem	Tlumič hluku	96,06	89,33	99,86	117,33
Za střelcem	Gradientní ÚZ	110,71	102,35	115,96	130,64
Za střelcem	Negradientní ÚZ	113,70	105,03	118,99	133,54
Za střelcem	Tlumič plamene	115,49	107,12	120,71	137,05
Za střelcem	Bez zařízení	120,21	111,36	125,45	139,71
V úrovni střelce	Tlumič hluku	96,96	89,81	101,82	120,66
V úrovni střelce	Gradientní ÚZ	112,95	104,55	118,16	137,80
V úrovni střelce	Negradientní ÚZ	113,04	104,71	118,25	138,36
V úrovni střelce	Tlumič plamene	118,01	109,63	123,32	142,68
V úrovni střelce	Bez zařízení	118,84	110,32	124,05	142,83

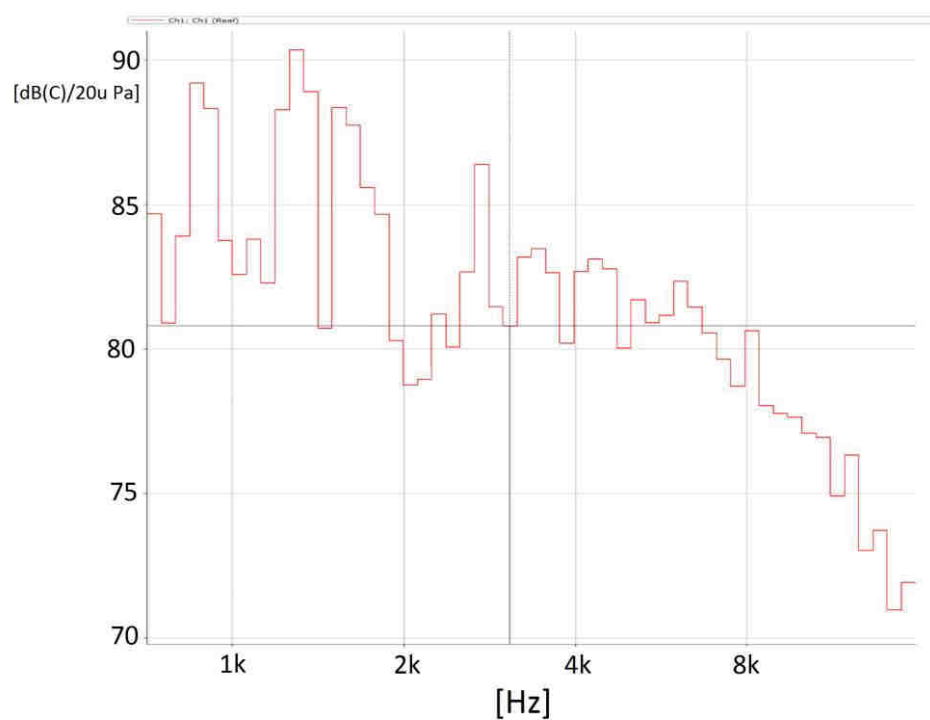
Procentuální pokles:

Umístění	Typ zařízení	LCFmax	LCSmax	LCImax	LCpeak
Za střelcem	Bez zařízení	0 %	0 %	0 %	0 %
Za střelcem	Tlumič plamene	3,92 %	3,80 %	3,77 %	1,90 %
Za střelcem	Negradientní ÚZ	5,41 %	5,68 %	5,14 %	4,41 %
Za střelcem	Gradientní ÚZ	7,90 %	8,08 %	7,56 %	6,49 %
Za střelcem	Tlumič hluku	20,09 %	19,78 %	20,39 %	16,02 %
V úrovni střelce	Bez zařízení	0 %	0 %	0 %	0 %
V úrovni střelce	Tlumič plamene	0,69 %	0,62 %	0,58 %	0,10 %
V úrovni střelce	Negradientní ÚZ	4,88 %	5,07 %	4,67 %	3,12 %
V úrovni střelce	Gradientní ÚZ	4,95 %	5,23 %	4,74 %	3,51 %
V úrovni střelce	Tlumič hluku	18,41 %	18,59 %	17,91 %	15,51 %

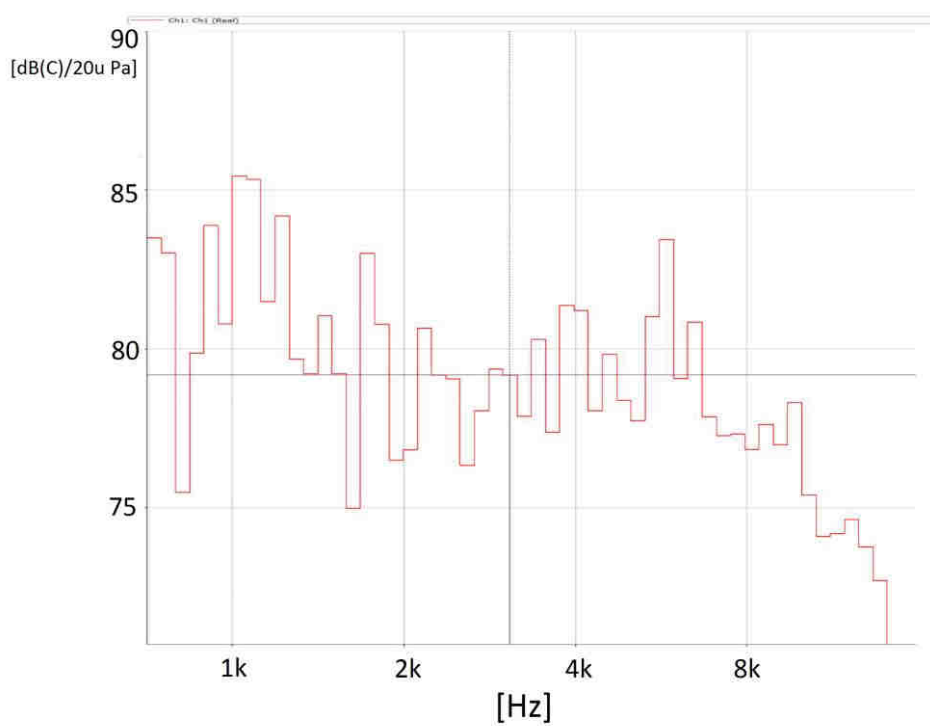
Oktávová analýza hluku bez úst'ového zařízení:



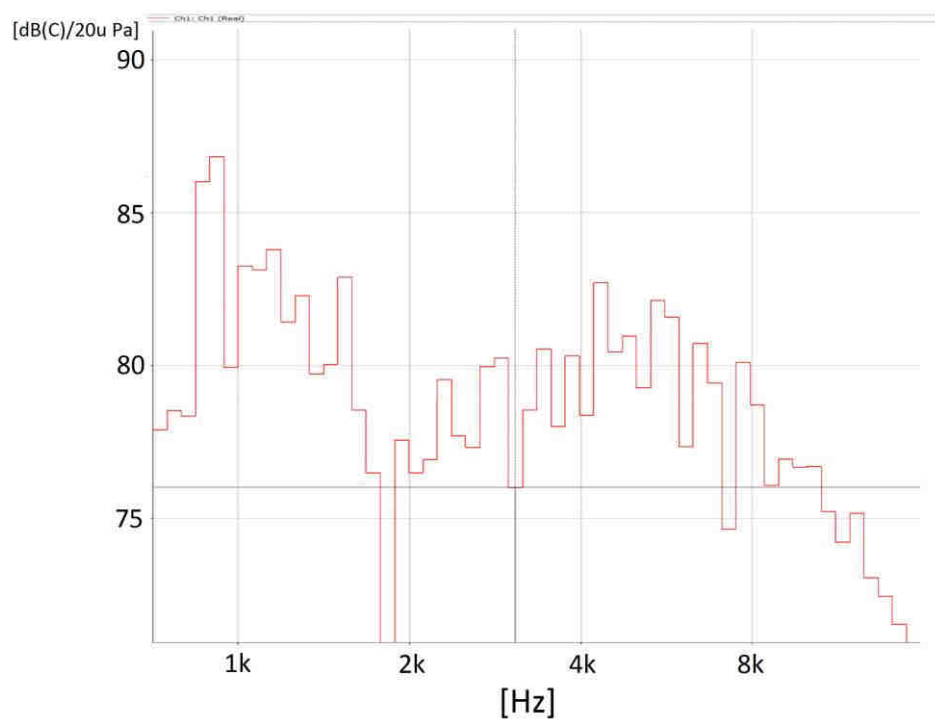
Oktávová analýza hluku s tlumičem plamene:



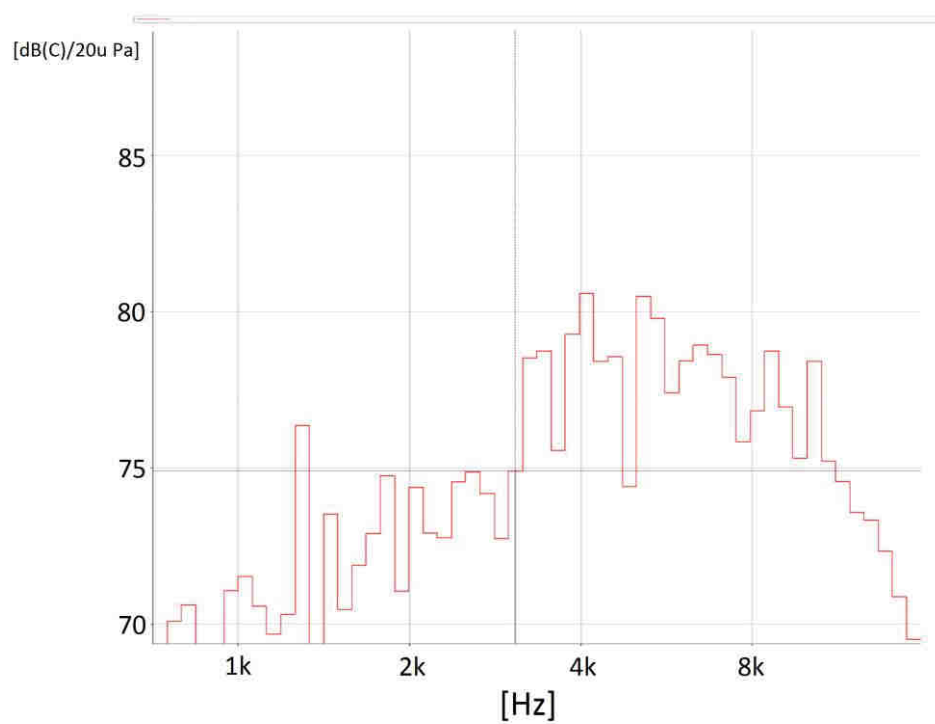
Oktávová analýza hluku s negradientním univerzálním úst'ovým zařízením:



Oktávová analýza hluku s gradientním univerzálním úst'ovým zařízením:



Oktávová analýza hluku s tlumičem hluku:



3D graf vývoje frekvenčních pásem v čase pro tlumič hluku:

Ch1: Ch1

